

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Vibrodiagnostika strojních zařízení**  
**Vibrodiagnostics of Machinery Equipment**

**2018**

**Vojtěch Vachutka**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Vachutka**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Vibrodiagnostika strojních zařízení.  
Vibrodiagnostics of Machinery Equipment.**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Možnosti diagnostiky elektrických pohonů na základě vibrací.  
Výběr vzorku pohonů pro provedení diagnostiky.  
Měření a vyhodnocení vibrací.  
Komplexní vyhodnocení a prezentace výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:


BILOŠ,J.,BILOŠOVÁ,A.: Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů, část -  
Vibrační diagnostika, VŠB-TUO, 2012  
RUSS,D.: Metody analýzy vibračních signálů, VUT Brno, 2016  
HELEBRANT,F.: Vibrační diagnostika, Diagnostický a technický institut Bohumín, 2007  
HELEBRANT,F., ZIEGLER,J.: Technická diagnostika a spolehlivost. II Vibrodiagnostika, VŠB - TUO,  
2004  
JAKSCH,I., Technická diagnostika: Měření a diagnostika vibrací. TUL Liberec, 2014  
ČSN-EN 60034-14 a další dle pokynů vedoucího práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

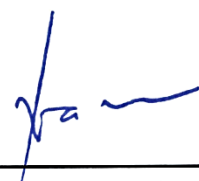
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Bernat, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry




  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *16. dubna 2018*

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval mým konzultantům a kolegům za ochotný přístup při konzultacích na téma mé diplomové práce, a to zejména během vykonávání měření a další užitečné praxe v průběhu stáže ve společnosti Hempel Elektromaschinenbau. Tyto pracovní stáže byly v zahraničí, rád bych proto poděkoval také naší fakultní koordinátorce Mgr. Janě Bogdové a celému oddělení zahraničních mobilit za ochotný přístup při vyřizování mých stáží. Rovněž poděkuji Dipl.-Ing. Klausu Hemplovi za možnost absolvování těchto stáží. Měl jsem zajištěny výborné podmínky pro splnění mých úkolů a cílů. Velké díky také patří mému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Bernatovi, Ph.D., který se mnou konzultoval veškeré nesrovnalosti a nejasnosti během řešení mé diplomové práce.



## **Abstrakt**

Tato práce vznikla na základě dvou absolvovaných stáží v německé společnosti Hempel Elektromaschinenbau, která se mimo jiné zabývá vibrodiagnostikou a vykonává ji v průmyslových podnicích jako externí firma. V úvodu práce je vysvětlena podstata vzniku vibrací a jejich měření, což zahrnuje snímání a zpracování signálu. Tato diplomová práce se zaměřuje především na měření vibrací a jejich vyhodnocení, což je také podstatou diagnostiky, a tedy i technické údržby. V rámci měření vibrací musí být také definováno, které veličiny jsou pro popis vibrací důležité a měřitelné. V teoretické části práce jsou popsány nejčastější možné poruchy a závady strojních zařízení způsobené mechanickými anebo elektromagnetickými příčinami. Tato práce je zaměřena na frekvenční analýzu vibračních spekter. V teoretické části u popisu poruch je také uveden popis diagnostiky závady pomocí frekvenčních spekter. V některých případech jsou také uvedeny alternativy k frekvenční analýze. Ve druhé části je práce soustředěna na praktický pohled vibrodiagnostiky v současné době. Jsou zde popsány dva způsoby sběru dat, přičemž u měření formou pochůzky jsou uvedeny směry měření na strojních zařízeních. Následují praktická měření strojů, u kterých se vyskytla závada. Analýza a vyjádření ke stavům strojů se opírá právě o teoretickou část, kde byly vysvětleny souvislosti mezi frekvencemi ve spektrech vibrací. Na měřených příkladech je vysvětlena důležitost a podstata vibrodiagnostiky, převážně pak frekvenční analýzy. V závěru práce je pojednáno o možném potenciálu vibrodiagnostiky a možném předcházení poruchovosti strojních zařízení v budoucnu.

## **Klíčová slova**

Vibrodiagnostika, frekvenční spektrum, demodulace, rychlost, zrychlení, poruchy, závada, frekvenční analýza, pochůzka, online systém, mechanické příčiny, elektromagnetické příčiny.

## **Abstract**

This master thesis is based on two internships in the German company Hempel Elektromaschinenbau, which provides vibrodiagnostics in the factories as an external company. Beginning of the thesis deals with the description of the source of vibrations, their measuring and signal process theory. The master thesis is focused especially on vibration measuring and reporting, which are two fundamental parts of the technical maintenance. In the vibrodiagnostic one must define which parameters are relevant and important and therefore should be measured. In the theoretical part of the thesis, the most common damages of the machinery equipment are described. The whole thesis is focused on a frequency analysis of the vibration spectrums. Description of the damages includes also the images of frequency spectrums. However, sometimes is the frequency analysis not sufficient, therefore are given measuring alternatives. The second part of the thesis is focused on practical view of the actual measuring methods in the vibrodiagnostics. Here are described two ways of data collecting and how to measure during the route measurement. Real measurements of machinery equipment follow, where the damages have been found. Analysis and reporting of the spectrums are based on theoretical part, especially on the part where the connections between frequencies of the spectrums were explained. In the measured examples, the importance of the vibrodiagnostics is explained, especially frequency analysis. In the end of the thesis, the future and possible potential of the vibrodiagnostics is explained.

## **Key words**

Vibrodiagnostics, frequency spectrum, demodulation, speed, acceleration, damages, frequency analysis, route, online system, mechanical causes, electromagnetic causes.

# Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Mechanické kmitání .....	- 2 -
1.1 Příčiny vibrací .....	- 2 -
1.2 Budící síla a její odezva .....	- 2 -
1.3 Měřené veličiny.....	- 5 -
1.3.1 Výchylka .....	- 5 -
1.3.2 Rychlost.....	- 5 -
1.3.3 Zrychlení .....	- 6 -
1.3.4 Obálka zrychlení.....	- 6 -
2 Naměřené signály .....	- 7 -
2.1 Fourierova transformace .....	- 7 -
2.1.1 Chyby ovlivňující diskretizaci.....	- 9 -
2.2 Dynamická data.....	- 10 -
2.3 Statická data .....	- 11 -
3 Snímače vibrací .....	- 12 -
3.1 Snímač výchylky.....	- 12 -
3.2 Snímač rychlosti.....	- 12 -
3.3 Snímač zrychlení.....	- 13 -
4 Druhy poruch a jejich diagnostika .....	- 15 -
4.1 Mechanické poruchy .....	- 15 -
4.1.1 Nevyváženost .....	- 16 -
4.1.2 Nesouosost.....	- 18 -
4.1.3 Poškození valivých ložisek.....	- 20 -
4.1.4 Mechanické uvolnění .....	- 24 -
4.1.5 Rezonance .....	- 25 -
4.1.6 Přidírání rotoru .....	- 26 -
4.1.7 Ozubené a řemenové převody .....	- 27 -
4.2 Elektromagnetické poruchy .....	- 29 -
4.2.1 Poruchy rotorových tyčí a prstenců.....	- 29 -
4.2.2 Účinky frekvenčního měniče.....	- 32 -
4.2.3 Ložiskové proudy .....	- 33 -

---

4.2.4	Statická excentricita .....	- 35 -
4.2.5	Dynamická excentricita .....	- 36 -
4.2.6	Nedokonalé připojení motoru.....	- 37 -
5	Měření vibrací v průmyslových podnicích.....	- 38 -
5.1	Měření formou pochůzky .....	- 38 -
5.1.1	Směry měření .....	- 40 -
5.2	Měření online systémem .....	- 43 -
5.3	Analýza a vyhodnocení naměřených dat.....	- 45 -
6	Měření vibrací mechanických příčin.....	- 47 -
6.1	Vývoj poruchy valivého ložiska.....	- 47 -
6.2	Kavitace .....	- 53 -
7	Měření vibrací elektromagnetických příčin .....	- 55 -
7.1	Měření motoru napájeným frekvenčním měničem .....	- 55 -
7.2	Měření motoru s přerušenou rotorovou tyčí.....	- 63 -
8	Budoucnost vibrodagnostiky.....	- 66 -
8.1	Využití snímače ABB .....	- 66 -
8.2	Vizualizace.....	- 67 -
9	Závěr .....	- 68 -
10	Citovaná literatura .....	- 69 -

---

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$n$	$\text{min}^{-1}$	Otáčky
$f$	Hz	Frekvence
$t$	s	Čas
$x$	m	Výchylka
$v$	$\text{mms}^{-1}$	Rychlost
$a$	$\text{ms}^{-2}$	Zrychlení
$g$	$\text{ms}^{-2}$	Gravitační zrychlení
$F$	N	Síla
$\varphi$	rad	Fázový posun
$\omega$	$\text{rads}^{-1}$	Úhlová rychlost
$B_d$	mm	Průměr valivého prvku
$P_d$	mm	Roztečný průměr
$U$	V	Napětí
$I$	A	Proud
$C$	F	Kapacita
$L$	mm	Délka řemene
$D$	mm	Průměr hnací řemenice
$Q_R$	(-)	Počet rotorových drážek
$2p$	(-)	Počet pólových dvojic

## Seznam použitých zkratek

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
<i>RMS</i>	Root Mean Square
<i>IP</i>	Ingress protection
<i>IM</i>	International Mounting
<i>A/D</i>	Analog/digital
<i>CF</i>	Crest factor
<i>SEE</i>	Spectral Emitted Energy
<i>BSF</i>	Ball Spin Frequency
<i>BPMI</i>	Ball Pass Frequency of Inner ring
<i>BPFO</i>	Ball Pass Frequency of Outer ring
<i>FTF</i>	Fundamental Train Frequency
<i>RBPF</i>	Rotor Bar Pass Frequency

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
Obr. 1.1	Vynucené kmitání způsobené harmonickou silou	- 3 -
Obr. 1.2	Volné kmitání vyvolané impulsní budící silou	- 4 -
Obr. 1.3	Kmitání buzené silou náhodného průběhu	- 4 -
Obr. 1.4	Samobuzené kmitání	- 5 -
Obr. 2.1	Princip Fourierovy transformace	- 7 -
Obr. 2.2	Chyba typu alyasing	- 9 -
Obr. 2.3	Chyba únikem	- 10 -
Obr. 2.4	Frekvenční spektrum zrychlení	- 11 -
Obr. 3.1	Schéma akcelerometru	- 13 -
Obr. 3.2	Tvarové provedení akcelerometru	- 14 -
Obr. 4.1	Statická nevyváženost	- 16 -
Obr. 4.2	Momentová nevyváženost	- 17 -
Obr. 4.3	Obecná nevyváženost	- 17 -
Obr. 4.4	Frekvenční spektrum nevyváhy	- 18 -
Obr. 4.5	Úhlová nesouosost	- 19 -
Obr. 4.6	Paralelní nesouosost	- 19 -
Obr. 4.7	Diagnostika úhlové nesouososti	- 20 -
Obr. 4.8	Diagnostika paralelní nesouososti	- 20 -
Obr. 4.9	Konstrukce valivého ložiska	- 21 -
Obr. 4.10	Závady částí ložiska	- 22 -
Obr. 4.11	Mechanické uvolnění	- 24 -
Obr. 4.12	Měkká patka	- 25 -
Obr. 4.13	Rozpoznání rezonance	- 26 -
Obr. 4.14	Spektrum a fáze rezonance	- 26 -
Obr. 4.15	Časový signál rychlosti vibrací	- 27 -
Obr. 4.16	Spektrum vibrací převodovky	- 28 -
Obr. 4.17	Schéma řemenového převodu	- 28 -
Obr. 4.18	Přerušení rotorové tyče	- 30 -
Obr. 4.19	Spektrum přerušení rotorové tyče	- 30 -
Obr. 4.20	Vývoj závady přerušení rotorové tyče	- 31 -
Obr. 4.21	Frekvenční spektrum proudu	- 31 -
Obr. 4.22	Uvolnění rotorových tyčí	- 32 -
Obr. 4.23	Účinky frekvenční měniče	- 32 -
Obr. 4.24	Hřídelová napětí	- 33 -
Obr. 4.25	Cesty ložiskových proudů	- 34 -
Obr. 4.26	Stopy na ložisku po ložiskovém proudu	- 35 -

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Obr. 4.27	Statická excentricita	- 36 -
Obr. 4.28	Dynamická excentricita	- 37 -
Obr. 4.29	Nedokonalé připojení motoru	- 37 -
Obr. 5.1	Mapa měření společnosti HE	- 38 -
Obr. 5.2	Směry měření na motoru	- 41 -
Obr. 5.3	Směry měření u řemenového převodu	- 41 -
Obr. 5.4	Směry měření motoru a čerpadla	- 42 -
Obr. 5.5	Směry měření na převodovce	- 42 -
Obr. 5.6	Strom zapojení online systému Sledování <i>alarmů online</i>	- 43 -
Obr. 5.7	Sledování alarmů online systému	- 44 -
Obr. 5.8	Měření motoru na střeše pece	- 45 -
Obr. 5.9	Měřené motory na pecích	- 45 -
Obr. 5.10	Analýza spektra pomocí kurzoru	- 46 -
Obr. 5.11	Trendová křivka vibrací	- 46 -
Obr. 6.1	Měřený motor	- 47 -
Obr. 6.2	Schéma sušící sekce	- 47 -
Obr. 6.3	Demodulační spektrum	- 48 -
Obr. 6.4	Frekvenční spektrum zrychlení	- 48 -
Obr. 6.5	Násobky poruchové frekvence	- 49 -
Obr. 6.6	Trendová křivka demodulace a zrychlení	- 49 -
Obr. 6.7	Zubová frekvence převodovky	- 50 -
Obr. 6.8	Trendová křivka bez zubové frekvence	- 50 -
Obr. 6.9	Trend demodulačních hodnot	- 51 -
Obr. 6.10	Waterfall demodulačních spekter	- 51 -
Obr. 6.11	Waterfall spekter zrychlení	- 52 -
Obr. 6.12	Soustrojí motoru a čerpadla	- 53 -
Obr. 6.13	Frekvenční spektrum zrychlení	- 53 -
Obr. 6.14	Časový signál rychlosti	- 54 -
Obr. 7.1	Frekvenční spektrum s frekvencí měniče	- 56 -
Obr. 7.2	Poškození vinutí	- 57 -
Obr. 7.3	Mezizávitový zkrat	- 57 -
Obr. 7.4	Zbarvený poškozený rotor	- 57 -
Obr. 7.5	Poškozená hřídel	- 57 -
Obr. 7.6	Spálené mazivo v krytu ložiska	- 58 -
Obr. 7.7	Poškozené vnitřní kroužky ložiska	- 58 -
Obr. 7.8	Poškozené ložisko	- 58 -
Obr. 7.9	Naměřené průběhy proudů	- 59 -
Obr. 7.10	Trendy efektivních hodnot proudů	- 60 -
Obr. 7.11	Trendová křivka procentní chyby proudu	- 61 -



## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Obr. 7.12	Waterfall diagram frekvenčních spekter	- 61 -
Obr. 7.13	Spektrum přerušení rotorové tyče	- 63 -
Obr. 7.14	Poruchová frekvence s postranním pásmem	- 64 -
Obr. 7.15	Násobky poruchové frekvence	- 64 -
Obr. 8.1	Smart sensor ABB	- 66 -

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
Tab. 5.1	Technické parametry měřících přístrojů	- 39 -
Tab. 6.1	Štítkové údaje motoru	- 47 -
Tab. 7.1	Štítkové hodnoty motoru	- 55 -
Tab. 7.2	Elektrické měření motoru	- 56 -
Tab. 7.3	Naměřené hodnoty odporů a indukčnosti vinutí	- 59 -
Tab. 7.4	Naměřené izolační odpory	- 59 -
Tab. 7.5	Srovnání hodnot po výměně měniče	- 60 -
Tab. 7.6	Štítkové hodnoty motoru	- 63 -

---

# Úvod

Tato diplomová práce vznikla na základě absolvování dvou zahraničních pracovních stáží ve společnosti Hempel Elektromaschinenbau GmbH<sup>1</sup>. Obě tyto stáže proběhly v magisterském studiu. Společnost HE se zabývá především opravou elektrických strojů, čerpadel a dalších zařízení. Mimo opravy a servis se také zabývá oborem technické diagnostiky, v podobě samostatného oddělení, které vzniklo před deseti lety a stále se rozvíjí. Společnost HE se nachází v průmyslové oblasti západního Německa ve spolkové zemi Severní Porýní Vestfálsko. Vzhledem k vysoké koncentraci těžkého průmyslu v podobě chemických a papírenských závodů, elektráren a dalších podniků se vytváří poptávka po dlouhotrvajícím provozu bez náhlých a nečekaných odstávek výrobních linek, způsobených poruchami pohonů.

Technická diagnostika je realizovatelná mnoha způsoby, které byly zpracovány v mé bakalářské práci<sup>2</sup>. Jedním z těchto způsobů je obor vibrodiagnostika, který je i tématem této diplomové práce. Diplomová práce navazuje na mou BP, ve které je právě poslední kapitola věnována obecnému rozměru vibrodiagnostiky. V dnešní době je vibrodiagnostika samostatný neustále se rozvíjející obor a jeho využití má v praxi mnoho podob.

Hlavním cílem diplomové práce je popsat dnešní využití vibrodiagnostiky v průmyslových podnicích a určit směr vývoje v budoucnu. Tyto úkoly jsou rovněž podstatou praxe, kterou jsem vykonal v průběhu pracovních stáží uskutečněných v létě roku 2016 a na jaře 2018. Práce zahrnuje měření v průmyslových podnicích, analýzu dat, konzultaci se zákazníkem a vedením HE. Měření se uskutečňovala ve společnostech zaměřujících se na papírenský, chemický, energetický, anebo potravinářský průmysl (UPM Hürth, Tempo, Kanzan, Kappa Zülpich, Currenta, Solvay). Všechny tyto společnosti spoléhají na důležitost měření vibrací. Analýza takovýchto měření je velmi důležitá pro plánování údržby podniků, která výrazně zefektivní výrobní proces a ušetří mnoho nákladů. Je třeba si uvědomit, že údržba strojů je stejně tak důležitá jako jejich návrh a výroba. Především u strojů s vysokými hodnotami výkonů je důležité kontrolovat jejich stav a docílit tak nepřetržitého provozu po dobu jejich navrhované životnosti, dosáhnout vyšší využitelnosti s minimálními odstávkami a neustále zlepšovat proces produkce. S tím je také spojená bezpečnost provozu a optimalizace výkonu stroje.

---

<sup>1</sup> Dále jen HE

<sup>2</sup> Dále jen BP

# 1 Mechanické kmitání

Vibrace je mechanické kmitání, které je vyvolané budícími silami. Tyto budící síly mají celou řadu příčin, které se dají rozdělit do dvou základních skupin, které jsou popsány níže. [3]

## 1.1 Příčiny vibrací

- **Elektromagnetické příčiny:**
  - ložiskové proudy
  - přesycení
  - přerušení rotorové tyče
  - negativní vliv drážkování rotoru a statoru
  - nesymetrie magnetického obvodu
  
- **Mechanické příčiny:**
  - statická a dynamická nevyváženost rotující části
  - nesouosost
  - chybné uložení ložisek, nebo jejich poškození
  - volba nekvalitního ložiska s výrobní vadou
  - nedostatek nebo přebytek maziva v ložiscích
  - ohnutý hřídel
  - poruchy ozubených a řemenových převodů
  - aerodynamické síly

Tyto příčiny, resp. poruchy jsou dále popsány v kapitole 4, kde je uveden zároveň postup jejich odhalení a analýzy.

## 1.2 Budící síla a její odezva

Mechanické kmitání vzniká na základě působení sil. Ve vibrodiagnostice jsou odezvou těchto sil vibrace. Síly jsou označovány jako budící a dělí se následující typy. [3][5]

- periodická budící síla
- impulsní budící síla
- budící síla náhodného průběhu

- **Periodická budící síla**

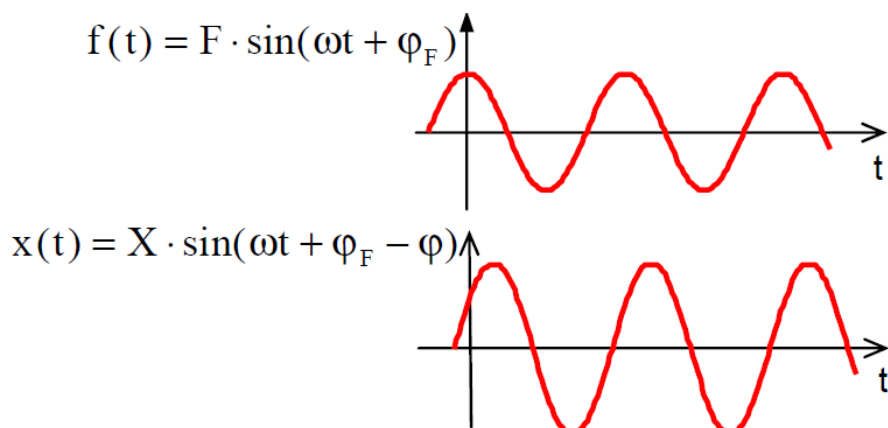
Periodická síla jako fyzikální veličina je závislá na čase. Pokud je síla harmonická, vyjadřuje její průběh vzorec (1). Tento druh síly je tím nejjednodušším případem a v praxi ne velmi obvyklým, avšak většinu sil rotujících strojů se dá vyjádřit jako součet harmonických sil. Tím pádem lze popsat

periodickou sílu a její vliv na vibrační odezvu pomocí harmonické síly a odezvy na ni. Na pružně uložené těleso působí harmonická síla  $f(t)$ . Pohyb vyvolaný touto silou je rovněž harmonický se stejnou úhlovou frekvencí, ale s jinou amplitudou, což je zřetelné na grafu obr. 1.1. Tento druh kmitání je nazýván jako vynucené kmitání. [5]

$$f(t) = F \cdot \sin(\omega t + \varphi_F) \quad (1)$$

Kde  $F$  ... amplituda budící síly  $[N]$   
 $\omega$  ... úhlová frekvence  $[rads^{-1}]$   
 $t$  ... čas  $[s]$   
 $\varphi_F$  ... počáteční fázový posuv budící síly.

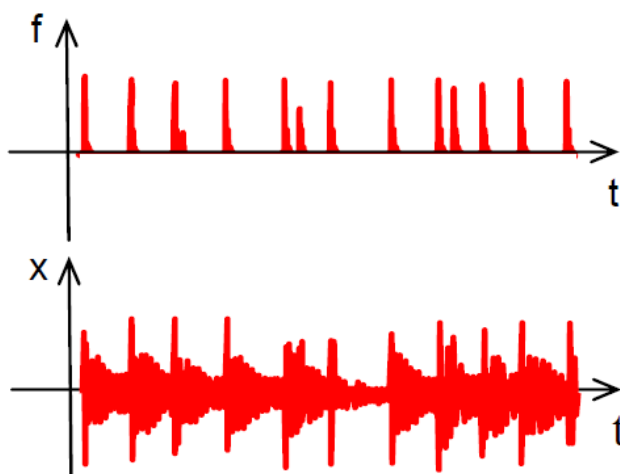
Kmitání, u kterého je budící síla a odezva ve formě vibrace periodická, vzniká například u nevyváženosti rotoru anebo špatného ustavení stroje.



**Obr. 1.1** Vynucené kmitání způsobené harmonickou silou [3]

- **Impulsní budící síla**

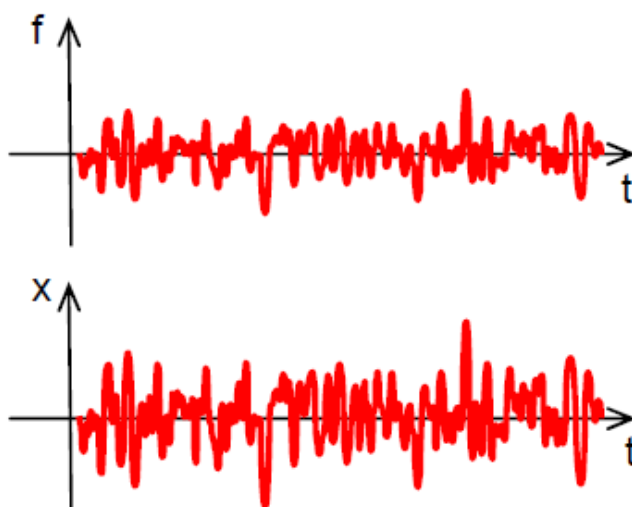
Tento druh budící síly vyvolává tzv. volné kmitání o jedné nebo více vlastních frekvencí. Vhodným příkladem takového kmitání je například rozeznění zvonu. Opět se jedná o vychýlení tělesa z rovnovážné polohy. U strojních zařízení je impulsní budící síla známá v podobě vibrací například u závad ve valivých ložiscích. Výchylka volných kmitů s jejich vlastní frekvencí je znázorněna na obr. 1.2. [3][4]



*Obr. 1.2 Volné kmitání vyvolané impulsní budící silou [3]*

- **Budící síla náhodného průběhu**

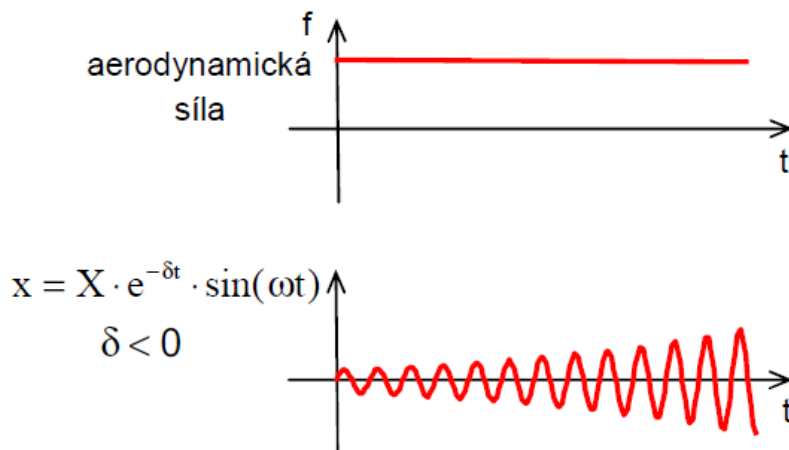
Pokud na těleso působí síla náhodného průběhu, je odezva rovněž náhodná. Nicméně stejně jako u impulsní budící síly vzniká kmitání o vlastní frekvenci. Z toho vyplývá, že při jakékoliv skokové změně působící síly vzniká volné kmitání s vlastní frekvencí. Existence náhodného silového působení je u strojních zařízení pokaždé a vyskytuje se ve formě šumu. Šum se ve vibrační diagnostice může například projevovat jako nežádoucí turbulentní proudění. [3]



*Obr. 1.3 Kmitání buzené silou náhodného průběhu [3]*

Jiným typem kmitání je také samobuzené kmitání. Jedná se o vybuzené kmitání aerodynamickými silami, které může vést až k destruktivním účinkům. Takovýto jev se nazývá flutter a je v technických oborech nežádoucí. Samobuzené kmitání se vyskytuje, pokud je dané těleso obtékáno tekutinou a dochází k zpětné kladné vazbě mezi kmitáním tělesa na vlastní frekvenci a aerodynamickými silami. V daném slova smyslu dochází k takovému jevu, když vybuzené kmitání není dostatečně tlumeno a zvyšuje tím působení aerodynamických sil, které opětovně zvýší amplitudu kmitání tělesa.

Takovýto jev je zaznačen na grafu obr. 1.4. Problematika flutteru je hodně řešena v leteckém anebo stavebním průmyslu. Týká se ovšem i strojních zařízení například čerpadel, turbínových anebo kompresorových lopatek. [5][6]



Obr. 1.4 Samobuzené kmitání [3]

### 1.3 Měření veličiny

K měření a analýze vibrací je zapotřebí určit vhodné veličiny a najít postupy, jak je měřit. Jelikož jsou vibrace kmitavý mechanický pohyb, dá se tento pohyb popsat pomocí výchylky, rychlosti a zrychlení. Volba těchto veličin je velmi praktická, protože jsou všechny matematicky provázány viz vzorce (2), (3), (4).

#### 1.3.1 Výchylka

Výchylka vibrací je v podstatě dráha kmitu z rovnovážné polohy do maximální. Udává se v mikrometrech a ve vibrodiagnostice se používá pro měření nízkých frekvencí vibrací. Matematicky se dá vyjádřit druhou integrací zrychlení. Ve společnosti HE ale nebyla tato veličina pro měření a analýzu používána. [3] [13]

$$x(t) = X \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

#### 1.3.2 Rychlost

Velmi důležitou veličinou pro měření a analýzu vibrací je rychlost. Jedná se o rychlost mechanických kmitů a využívá se pro měření nízkých frekvencí vibrací od 10 Hz do 1000 Hz. U každého měření je přítomen šum, z čehož vyplývá, že u slabých signálů dosahuje měření značné chyby. V tomto smyslu je nejvhodnější pro nízké frekvence rychlost, jelikož má od šumu dostatečný odstup. Pomocí rychlosti se dají objevit poruchy jako například nevyváženost rotujících částí, ohnutý hřídel nebo nesouosost. Poruchy ložisek lze také zaznamenat v naměřených datech rychlosti, ale pouze až v poslední

etapě životnosti ložisek. Zpravidla je tato etapa životnosti alarmující a musí dojít k výměně ložisek.[6][13]

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = X \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (3)$$

### 1.3.3 Zrychlení

Na základě absolvovaných stáží usuzuji, že je zrychlení nejpodstatnější veličinou pro měření. Opět se jedná o zrychlení mechanických kmitů, které se dá změřit pomocí akcelerometru viz kapitola 3. Na rozdíl od rychlosti zahrnuje frekvenční rozsah měření zrychlení zpravidla vysoké frekvence do 5000 Hz. Pomocí zrychlení se analyzuje poškození ložisek nebo převodkových zubů. Také lze detekovat malé množství maziva v ložiscích. U zrychlení je potřeba uvést otáčky stroje, při kterých byly vibrace měřeny. Díky této informaci pak lze například jednoduše najít frekvence zubů v převodkách. [3][13]

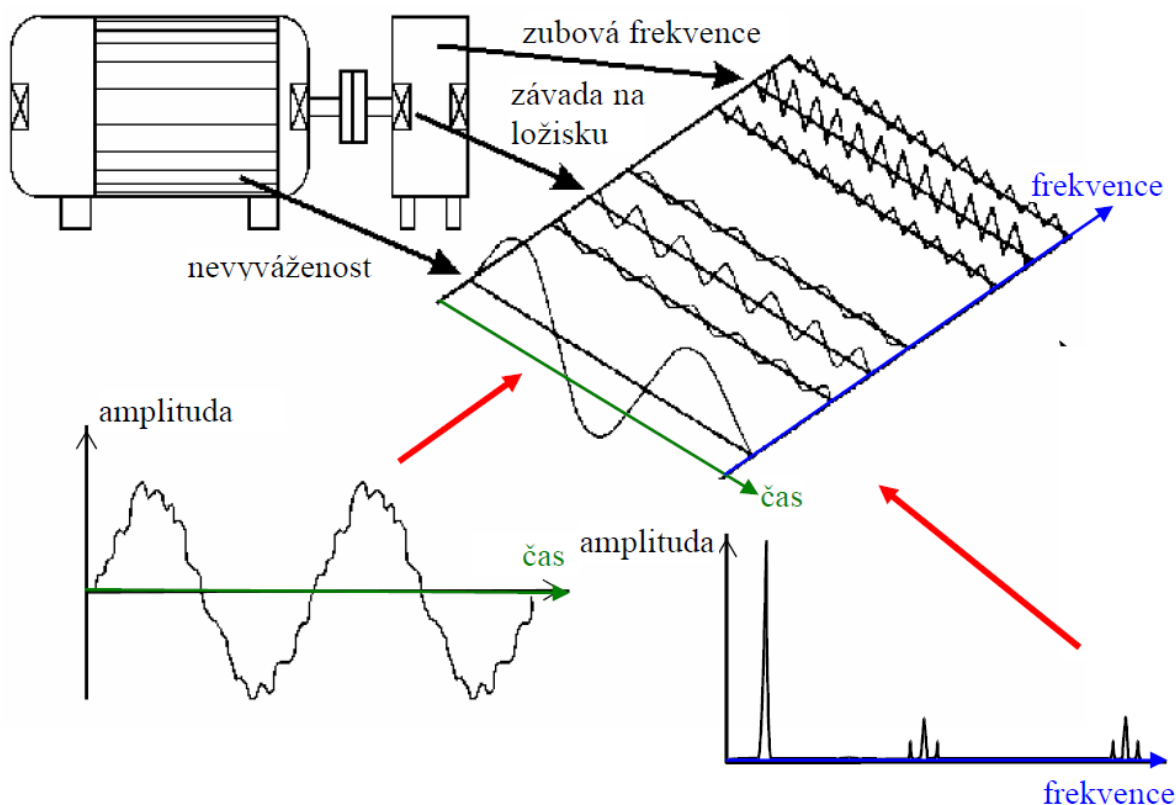
$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -X \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \quad (4)$$

### 1.3.4 Obálka zrychlení

Z měřených veličin jsou v této práci prakticky všechny popsány. Nicméně je zapotřebí uvést další cestu měření zrychlení pro podrobnější analýzu a predikci závad ložisek. U valivých ložisek se používá metoda tzv. obálka zrychlení. Ve své podstatě jde o to, že neupravený signál zrychlení obsahuje otáčkovou frekvenci a s ní spojené poruchy, jako je například nevyváženost. Pro dosažení frekvencí odpovídajícím odezvám na impulsy v ložiscích se využívá pásmového filtru, který vyloučí nízkofrekvenční část. Poté dochází k usměrnění signálu, aby z něj zůstaly pouze kladné zesílené hodnoty. Následně se na vytvořený průběh aplikuje obálkový filtr. [3][5][12]

## 2 Naměřené signály

V podkapitole 1.2 byly popsány síly podněcující vibrace. Měření pomocí analyzátorů je schopno zachytit průběh rychlosti a zrychlení v závislosti na čase. Jedná se tedy o časové průběhy. Pokud by měl motor pouze jeden zdroj vibrací, například otáčky rotoru, byl by průběh odezvy harmonický a jeho analýza jednoduchá. Ve strojních zařízeních je ovšem celá řada zdrojů vibrací. Pomocí měření dokážeme naměřit signál, který je v podstatě grafickým součtem vln, tedy všech jednotlivých složek zdrojů vibrací. Průběh mechanického kmitání v závislosti na čase je velmi obtížné analyzovat. Jiná situace ovšem nastává v případě frekvenční analýzy. Na obr. 2.1 lze v levém dolním rohu vidět časový průběh vibrací, který je složen z různých zdrojů mechanického kmitání. Tento průběh je pomocí Fourierovy transformace rozložen na jednotlivé složky vibrací ve frekvenčním spektru. V takovém spektru je podstatná frekvence kmitání daného zdroje a její amplituda. [3][4]



Obr. 2.1 Princip Fourierovy transformace [5]

### 2.1 Fourierova transformace

Pokud je funkce  $x(t)$  periodická v čase  $T$ , může být vyjádřena jako nekonečná posloupnost, viz vzorec (5).

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)] \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$



Z toho vyplývá, že původní funkce  $x(t)$  lze složit z mnoha sinusových průběhů o různých amplitudách a různých frekvencích, přičemž frekvence jednotlivých průběhů jsou násobky základní frekvence  $\omega$ . Koeficienty  $a_n$  a  $b_n$ , tzv. Fourierovy koeficienty funkce  $x(t)$  lze vypočítat na základě vzorců

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (6)$$

Naměřené vibrace v podobě časově závislé veličiny jako je rychlost nebo zrychlení se dají považovat za periodickou funkci v naměřeném intervalu  $T$ . Avšak pro získání opravdu periodického průběhu je při měření třeba dalších úprav signálu, kvůli zamezení chyby únikem a chyby vzorkováním. Dnešní analyzátory při měření převádějí analogový signál na digitální pomocí A/D převodníku. Převodník zaznamenává časový spojitý signál jako posloupnost  $N$  diskretních hodnot s pravidelnými časovými rozestupy v intervalu  $T$ . Obecně se pojednává o diskretizaci spojitého signálu. Diskretizace funkce  $x(t)$ , definována na množině  $N$  časových okamžiků  $t_k$  ( $k = 1, N$ ), lze definovat jako konečnou Fourierovu řadu viz vzorec (7). [3][6]

$$x_k (= x(t_k)) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} \left[ a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t_k}{T}\right) + b_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t_k}{T}\right) \right] \quad k = (1, N) \quad (7)$$

Již zmíněné Fourierovy koeficienty se vyjadřují jako amplituda  $c_n$  a fáze  $\Phi_n$  kde

$$c_n (= X_n) = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \Phi_n = \arctg\left(-\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (8)$$

Následná Fourierova řada má podobu vzorce (9)

$$x_k (= x(t_k)) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} \left[ c_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t_k}{T} + \varphi_n\right) \right] \quad (9)$$

Takto definovaný tvar Fourierovy transformace nese název diskretní Fourierova transformace (DFT – Discrete Fourier Transform). Fourierova řada, která vznikla je ve vibrodiagnostice označována jako frekvenční spektrum, kde jsou všechny jednotlivé amplitudy označovány jako frekvenční čáry. Platí zde základní vztah mezi délkou vzorku, počtem diskretních hodnot, vzorkovací frekvencí a rozsahem frekvenčního spektra. [3][10]

$$\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{f_s}{N} \quad (10)$$

$$f_{\max} = \frac{f_s}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{N}{T} \quad (11)$$

Kde

$f_s$  ... vzorkovací frekvence

$T$  ... délka vzorku

$N$  ... počet diskretních hodnot

$f_{\max}$  ... Nyquistova frekvence

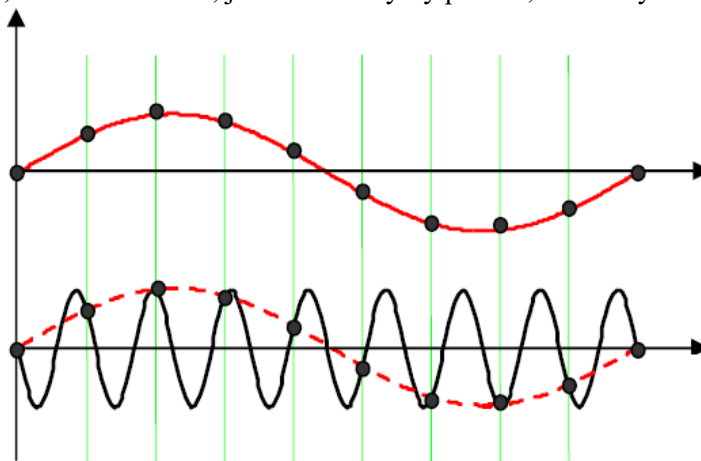
$\Delta f$  ... rozlišení čar ve spektru

V dnešní době se využívá FFT analýzy neboli Fast Fourier Transform. V tomto algoritmu se používá  $N$  jako celočíselná mocnina čísla 2. Frekvenční spektrum je však omezeno a reálná hodnota se liší od té teoretické. O tom pojednává následující podkapitola.[3][10]

### 2.1.1 Chyby ovlivňující diskretizaci

- **Chyba alyasing**

Jedná se o chybu, která může nastat, pokud vzorkovací frekvence není dostatečně vysoká, aby zachytila průběh měřeného signálu. Nejvyšší měřitelná frekvence je definována jako polovina vzorkovací frekvence. Chyba typu alyasing je zobrazena na grafu obr. 2.2, kde na horním průběhu je vzorkovací frekvence vůči průběhu dostatečná. Naproti tomu na spodním průběhu je použita stejná vzorkovací frekvence, aplikovaná diskretizaci průběhu s vyšší frekvencí. Výsledkem takové diskretizace vzniká chyba, v důsledku které, je naměřen mylný průběh, označený červenou čárkovanou barvou. [3] [8]



Obr. 2.2 Chyba typu alyasing [3]

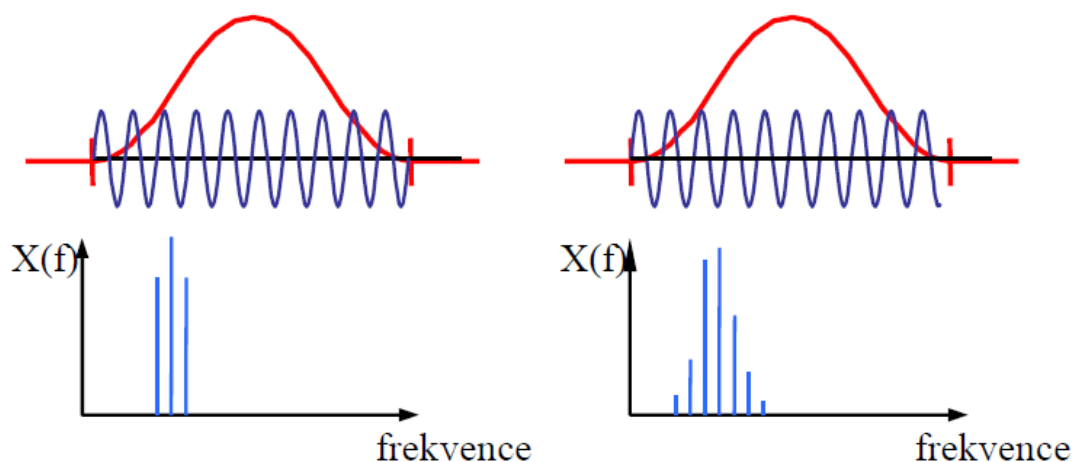
Chyba Alyasing se dá ovšem jednoduše odstranit pomocí anti-aliasingového filtru. Jedná se o dolní propust se strmou sestupnou hranou. Tento filtr je součástí každého analyzátoru současnosti a je třeba, aby byl zařazen před diskretizací, jelikož se jedná o analogové zpracování. Všechny frekvence, které jsou vyšší než vzorkovací frekvence, se odstraní z původního signálu. Jelikož není charakteristika

filtru zcela kolmá, odstraňuje se z horní části spektra rozsah v intervalu od  $0,8 f_s / 2$  (vzorkovací frekvence) do  $f_s / 2$ . Vzorkovací frekvence je pak definována vztahem (12). [3][8][10]

$$f_s = 2,56 \cdot f_{\max} \quad (12)$$

### • Chyba únikem

Dosud zde byla popisována Fourierova transformace periodického signálu, jelikož to je i její podstatou. Reálné signály vibrací ovšem nemají vždy pevně ohraničenou periodu a v některých periodách se průběhy signálu liší. Pokud nedojde k úpravě signálu, může dojít ke zkreslení frekvenčního spektra v důsledku tzv. úniku (leakage). Pro úpravu signálu se využívá váhového okna, díky kterému se zamezí chybě únikem. Jestliže do Fourierovy transformace vstupuje periodický signál tzn. celočíselný počet period sinusového signálu, bude po aplikaci váhového okna obdélníkového typu frekvenční spektrum stejné jako bez něj. Pokud signál nebude periodický, bude algoritmus transformace modelovat vzniklou nespojitost pomocí dalších sinusových průběhů a tím i dalších spektrálních čar. Toto řešení také není tím nejlepším, proto vznikly jiné druhy oken, která vytváří kompromis. Jedním z takových je Hanningovo okno, zobrazené na obr. 2.3. U konců průběhů se okno snaží blížit nule, aby nedocházelo k nespojitostem. U periodického průběhu (vlevo) vznikají místo jedné, tři spektrální čáry. Na druhou stranu u neperiodického signálu (vpravo) je situace daleko lepší, než kdyby se aplikovalo např. obdélníkové okno. Vzniklo pár dalších spektrálních čar, nicméně takový výsledek je akceptovatelný. [3][10]

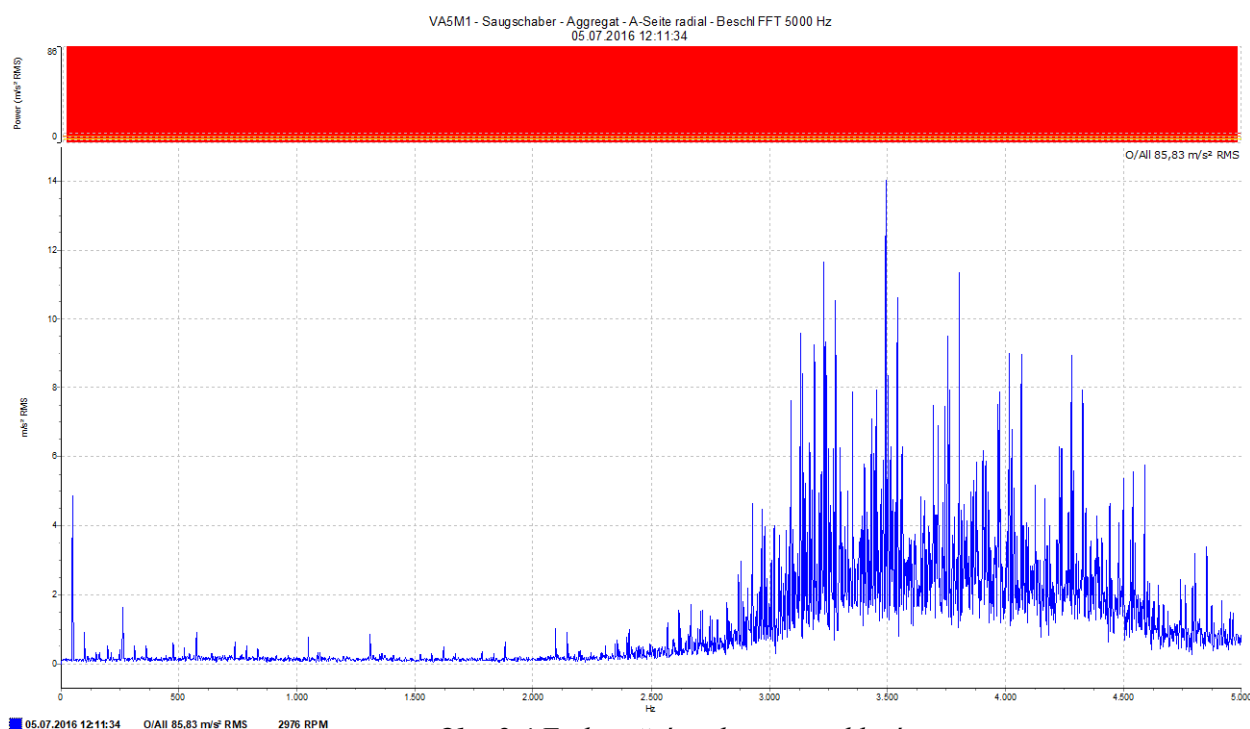


Obr. 2.3 Chyba únikem [3]

## 2.2 Dynamická data

Na základě FFT analýzy vzniká frekvenční spektrum veličin rychlosti a zrychlení. V podstatě se dnešní profesionální vibrodiagnostika opírá především o frekvenční analýzu. Každá frekvence tedy v takovém spektru má svůj význam a popisuje buď přirozené děje, začínající poruchu anebo jasné poškození strojního zařízení. O detekci a analýze spekter pojednává samostatná kapitola 4. S pomocí frekvenčních spekter a jejich analýzy lze predikovat životnost stroje a následně informovat o jeho stavu daný výrobní podnik, který poté naplánuje svoji údržbu. Díky této analýze lze neustále vylepšovat vývoj

ložisek nebo například konstrukci strojů. Pro přehlednost je v této podkapitole jedno z takových frekvenčních spekter na obr. 2.4. [7] [15]



**Obr. 2.4** Frekvenční spektrum zrychlení

## 2.3 Statická data

Měření statických dat je chápáno jako měření jedné hodnoty (RMS, PEAK) která vypovídá o vibracích stroje. Je jasné, že z takové hodnoty se nedá určit přesná porucha a její zapříčení. Nicméně může upozornit na nepříznivý stav stroje. Na základě takového upozornění např. formou alarmu pak technický diagnostik změří anebo zanalyzuje stav stroje podle frekvenční analýzy. RMS nebo také efektivní hodnota vibrací je u každého měření odlišná, jelikož i časové průběhy rychlosti a zrychlení vibrací se mění. Odlišnosti v průbězích a neperiodicita již byla probrána v podkapitole 2.1.1. Měření statických hodnot je také aplikováno na zkušebně nově vyrobených nebo opravených strojů. Další možností je měření špičkové hodnoty PEAK. Poměrem špičkové hodnoty vůči efektivní hodnotě se dosáhne tzv. činitele výkmitu (crest factor). [3][7]

$$CF = \frac{PEAK}{RMS} \quad (13)$$

Pokud hodnota činitele výkmitu dosahuje čísla 3, převládá sinusový charakter. Pokud je ovšem tato hodnota větší než 3 převládá impulsní charakter signálu. Tato metoda může sloužit pro orientační kontrolu ložisek. Při měření rychlosti vibrací, existuje také měřítko hodnot, které posuzuje jejich velikost v závislosti na velikosti měřeného stroje. Tímto měřítkem je norma ISO 10816 – 3, která také definuje frekvenční rozsah měření a sice 10 – 1000 Hz.[1] [3][14]

### 3 Snímače vibrací

Doposud zde bylo popisováno měření pomocí analyzátoru. K měření vibrací jsou ještě zapotřebí snímače, který mají za úkol zpracovat mechanickou veličinu na elektrickou, díky které lze kmity analyzovat. V podstatě lze měřit jakoukoliv veličinu, která popisuje mechanické kmitání. Pro každou veličinu tedy existuje snímač, který je schopen ji měřit. Snímače se liší způsobem převodu mechanické veličiny na elektrickou veličinu. Dále se liší použitelným frekvenčním a dynamickým rozsahem. Dynamický rozsah znamená rozsah amplitud, které dokáže snímač změřit. U frekvenčního rozsahu dále záleží, jaký druh vibrací je požadován k měření. Například u bezkontaktních snímačů výchylky se měření v rozsahu od 1000 do 2000 Hz nedá považovat za věrohodné, protože zde dochází k podobnosti mezi nerovností povrchu a požadované měřené výchylky. U snímačů rychlosti je rozsah kvůli konstrukci limitován na frekvenční rozsah od 10 do 1500 Hz. Nejlepším řešením snímače se jeví akcelerometr z důvodu frekvenčního rozsahu měřitelného od 1 Hz do 30 kHz. V této diplomové práci bude popsán jen snímač výchylky, rychlosti a zrychlení. U každého je popsán jeho princip a využití.[3][13]

#### 3.1 Snímač výchylky

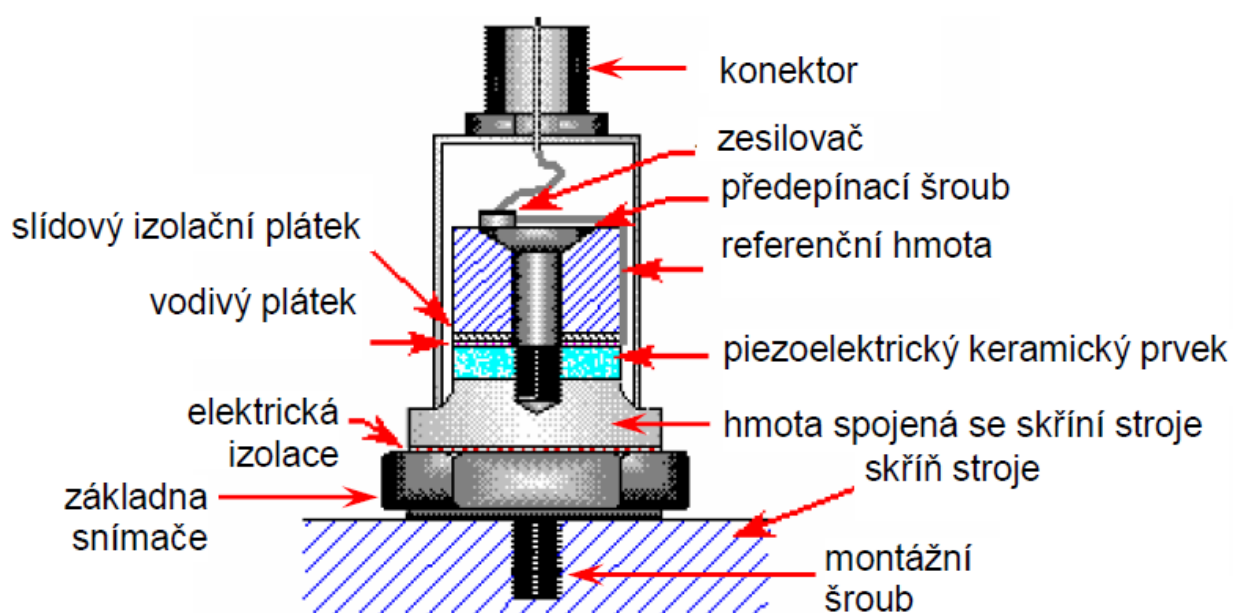
Existuje celá řada snímačů výchylky vibrací, které fungují na různých principech snímání. Mezi takové typy patří laserové, ultrazvukové, kapacitní anebo indukční snímače. V dnešní době je používán bezkontaktní snímač výchylky, jehož princip spočívá ve změně vířivých proudů, vyvolanou změnou odporu prostředí. V podstatě snímač měří vzdálenost mezi objektem a špičkou snímače. Generací vysokofrekvenčního střídavého proudu se naindukují v místě měřeného objektu napětí, vyvolávající vířivé proudy. Na základě změny energie, kterou zapříčiní vířivé proudy se mění také impedance cívky ve snímači. Pomocí této informace poté dojde k analýze výchylky. Vzhledem ke změně impedance je velmi důležité, aby odpor přírodních kabelů vedoucí vysokofrekvenční signál byl konstantní. Taktéž je kladen důraz na stínění kabelu. Výstupní vyhodnocovací napětí je závislé na frekvenci, vodivosti měřeného materiálu a magnetické permeabilitě. Z tohoto důvodu jsou vyráběné typy snímačů, určené přímo na konkrétní materiál. Jelikož jsou snímače výchylky náročné na jejich výbavu a konstrukci, využívají se především k měření vibrací hřidelů.[7] [13]

#### 3.2 Snímač rychlosti

Snímače rychlosti pracují zejména na principu elektromagnetické indukce. Snímač tvoří dvě základní části. Tou první je permanentní magnet, který je pevně spojen s konstrukcí snímače a tedy, i se zařízením, kde jsou vibrace měřeny. Druhou podstatnou částí je cívka, ve které se v důsledku vibrací, tzn. pohybu magnetu indukuje elektrické napětí. Na základě velikosti napětí se následně vyhodnocují vibrace. U tohoto druhu snímače je rovněž důležitá jeho konstrukce a směr uchycení na měřeném zařízení, jelikož ve vertikálním a horizontálním směru působí na konstrukci gravitační síla. Je důležité, aby byl snímač pevně přichycen a ideálně, aby plocha pod snímačem byla rovná a o něco větší, než je plocha snímače. Frekvenční rozsah snímačů tohoto druhu se pohybuje od 10 Hz do 1000 Hz. Je dán tuhostí pružin, hmotností cívky s jádrem a také oblastí frekvencí, ve kterých se rychlosti vibrací nejvíce projevuje. Velkou výhodou snímače je jeho přesnost. Naopak nevýhodou je křehkost konstrukce, což znemožňuje přenositelnost v podobě pochůzky. Ideální aplikací je dlouhodobé spojení s konstrukcí měřeného zařízení. [3][13]

### 3.3 Snímač zrychlení

Snímač zrychlení neboli akcelerometr je v dnešní době nejpoužívanějším a nejuniverzálnějším snímačem v oboru vibrodiagnostiky. Snímá zrychlení mechanických kmitů a pomocí integrací naměřeného signálu zrychlení lze dospět k rychlosti anebo výchylce vibrací. Princip snímání vibrací spočívá v piezoelektrickém jevu. Při měření vibrací dochází k deformaci piezoelektrické destičky a vzniká elektrický náboj, který je přímo úměrný zrychlení vibrací. Piezoelektrická destička je umístěna mezi referenční hmotou a hmotou spojenou s konstrukcí snímače zobrazené na obr. 3.1. Referenční neboli setrvačná hmota je pružná a uložena na pružině v podobě předepínacího šroubu, společně s piezoelektrickou destičkou. Pokud měřený stroj vibruje, rozkmitá se hmota spojená s konstrukcí snímače, v důsledku působících sil. Referenční hmota se však nepohybuje a zůstává v klidu. Na základě působící síly na piezoelektrickou destičku vzniká již zmiňovaný elektrický náboj. Akcelerometr tím pádem měří absolutní vibrace z důvodu nekmitající referenční hmoty. Důležitou informací akcelerometru je také jeho citlivost, která určuje měřitelný frekvenční rozsah. Citlivost se udává v  $\text{pC/g}$  a její velikost ovlivňuje tuhost pružného uložení, materiálové tlumení a hmotnost referenční hmoty. Zpravidla je lepší citlivost u větších akcelerometrů s větší hmotností referenční hmoty. Na druhou stranu se v důsledku toho snižuje rezonanční frekvence. Jelikož je velikost vzniklého náboje malá, je zapotřebí umístění předzesilovače přímo ve snímači. Poté lze přenášet signál na delší vzdálenosti (v řádech jednotek metrů). Moderní akcelerometry takovýto předzesilovač mají a jejich citlivost se udává v  $\text{mV/g}$ , kde  $g$  vyjadřuje gravitační zrychlení. [3][13][15]



Obr. 3.1 Schéma akcelerometru[3]

Vzhledem ke konstrukci akcelerometru neovlivňuje jeho poloha měření. Na rozdíl od snímače rychlosti, lze akcelerometr použít ve vertikálním, horizontálním i axiálním směru. Tato skutečnost vychází z dostatečné tuhosti systému složeného z referenční hmoty a pružiny. Nicméně je zapotřebí, aby piezoelektrická destička nebyla žádným jiným způsobem namáhána, což se může stát špatným

upevněním snímače k měřicímu místu u tlakového typu snímače. Zároveň lze konstrukčně upravit snímač, aby piezoelektrickou destičku ovlivňovaly pouze měřené vibrace. Takovým typem je smykový snímač v provedení *delta – shear*, kde jsou piezoelektrické prvky umístěny do trojúhelníku. Dalším typem může být například ohybový snímač, který má sice velkou citlivost, ale je křehký a citlivý na rázy. [3][13]

Pro docílení správného měření záleží také na způsobu uchycení akcelerometru. Je důležité si uvědomit, že pokud je akcelerometr správně uchycen, bude vibrovat úplně stejně jako měřené zařízení, což vyvolá patřičnou sílu na piezoelektrickou destičku. Způsoby uchycení definuje také norma ČSN ISO 5348. Pro uchycení lze aplikovat následující způsoby:

- **Uchycení šroubem**

U tohoto druhu uchycení se klade důraz na čistou plochu, kde je snímač připevněn. Šroub by měl být kolmý ke snímači a díra v senzoru dostatečně hluboká. Jedná se o nejlepší spojení snímače a měřeného objektu. Právě díky této skutečnosti je minimálně ovlivněn frekvenční rozsah snímače.[13]

- **Uchycení lepidlem**

Využití lepidla je také jedna z možností úchyty. Zde je třeba volit správný druh lepidla, protože má vliv na frekvenční rozsah snímače. Povrch, který je pokryt lepidlem, by měl být čistý a drsný. Při použití lepidla s měkkou doplňkovou složkou se sice vyrovnají nerovnosti povrchu, na druhou stranu se sníží frekvenční rozsah. Prakticky není snímač přímo nalepen na měřicí místo. Většinou se ke stroji přilepí podložka se šroubem, na které je uchycen snímač. U lepidla se musí také dodržet dovolená teplota, vzhledem k měknutí lepidla.[13]

- **Uchycení magnetem**

Pravděpodobně nejrozšířenější druh uchycení je pomocí magnetu. Platí zde také podmínky přichycení jako například čistá plocha místa úchyty, kolmá a pevná poloha. Zpravidla je využíváno takového úchyty u analyzátorů, určeným k pochůzkám v průmyslových podnicích. To vyžaduje jednoduchost odpojení a připojení snímače k měřenému zařízení. Snímače zahrnují magnety, které jsou vyrobeny z kovů vzácných zemin, z důvodu lepšího a pevnějšího úchyty. Snímače jsou také tvarovány, aby lépe dosedaly na požadovanou plochu. U elektrických strojů, které pro odvod tepla využívají pasivního chlazení v podobě žebek, lze měřit vibrace pouze na žebrech stroje. Celistvá kulatá plocha špatně dosedá a výsledný naměřený signál je ovlivněn chybou měření. Tvar takového snímače lze vidět na obr. 3.2. [13]



**Obr. 3.2** Tvarové provedení akcelerometru

## 4 Druhy poruch a jejich diagnostika

V této kapitole jsou popsány nejznámější poruchy a postup jejich analýzy. Poruchy jsou zde rozděleny stejně jako příčiny, které tyto poruchy vyvolávají a sice poruchy mechanického charakteru a elektromagnetického charakteru. Kapitola bude zaměřena na diagnostiku pomocí analýzy frekvenčních spekter, která je nejrozšířenější a nejefektivnější metodou vibrodiagnostiky. V této práci již byla popsána frekvenční analýza. Všechny frekvence ve frekvenčním spektru mají svůj význam a na zkušeném diagnostikovi je tento význam pochopit a správně interpretovat. V některých případech ale není určení z frekvenčního spektra jednoznačné a využívá se měření fáze, což je v podstatě rozdíl fází mezi dvěma různými body na měřeném zařízení nebo ve stejném bodě za různých provozních podmínek. Fáze se udává ve stupních. [3][5][7]

### • Postup při diagnostice poruch

Při analýze frekvenčních spekter by se mělo dodržovat určitých postupů analýzy. V důsledku sbírání zkušeností v minulosti mají některá frekvenční spektra charakteristický tvar a vypovídají o stavu měřeného stroje. Taktéž poradí měřených veličin při analýze napovídá, které poruchy se ve stroji vyskytují nebo se teprve vyskytnou. Prvním spektrem, které je podrobena analýze je demodulační (obálkové) spektrum, vypovídající o stavu ložisek. Dalším je spektrum zrychlení a poté rychlosti. O tom ale více v jednotlivých podkapitolách. Základní metodika postupu je popsána v bodech níže:

- jaké frekvence jsou ve spektru a jaká je souvislost mezi nimi a otáčkovou
- jak velké jsou amplitudy důležitých frekvencí
- jak souvisí velikost amplitud u ostatních frekvencí – výskyt postranních pásem, násobky otáčkové frekvence, druhá harmonická je větší než otáčková apod.
- kterým zdrojům odpovídají frekvence – zubové, otáčkové, frekvence ložisek

### 4.1 Mechanické poruchy

Mechanický druh poruchy je spojen především s působením mechanických sil, související s otáčivým pohybem a odstředivou silou. Strojní zařízení většinou tvoří skupinu soustrojí, které je spojeno spojkou. Hnací zařízení nebo hnané zařízení má odlišné konstrukční a provozní vlastnosti a tím pádem také odlišně působící síly. Do mechanických poruch se také řadí poruchy ložisek nebo poruchy ozubených převodů. Jiné poruchy souvisí s chybným uložením rotoru, nevyvážeností anebo špatným usazením motoru. Všechny poruchy se projevují odezvou, kterou je zapotřebí změřit a analyzovat. Samozřejmě všechna poškození spolu mohou souviset. Některé závady zase mohou zapříčinit jiné. [3][12]

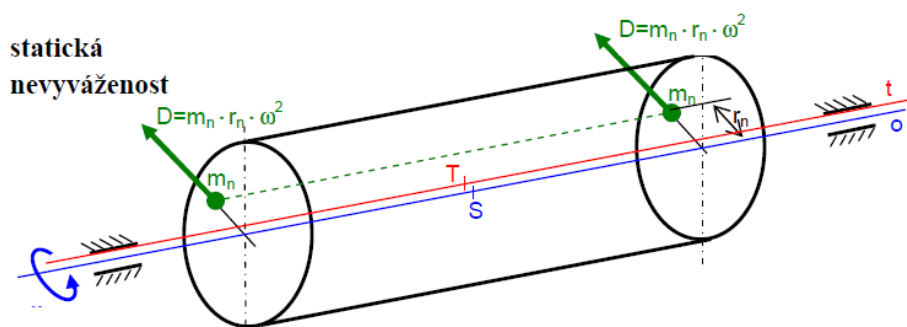


### 4.1.1 Nevyváženost

U všech rotačních strojních zařízení dochází k působení odstředivých sil. Tyto síly vznikají kvůli konstrukčním, výrobním a materiálovým příčinám. V reálném světě nelze zajistit zcela symetrické tvary, kterých je požadováno. Dále je výrobní proces ovlivněn nehomogenitou materiálu, ze kterého je rotor vyroben. Při konstrukci požadovaných tvarů je tedy využíváno tolerancí, které jsou určeny normami. I přes tyto konstrukční komplikace se výroba neustále soustřeďuje na to, aby se osa rotace, kde je její těžiště, shodovala s hlavní osou setrvačnosti. Ve většině případů rotačních strojů je odstředivá síla nežádoucí a cílem je její minimalizace. Avšak v některých aplikacích je odstředivá síla podstatou samotného zařízení. K minimalizaci odstředivých sil se dosahuje pomocí vyvažování rotačních částí stroje. Vzhledem, k poloze osy se pak nevyváženost dělí na tři typy. Konkrétně statickou, momentovou a obecnou nevyváženost. [3][9]

- **Statická nevyváženost**

O statickou nevyváženost rotoru se jedná, pokud je hlavní osa setrvačnosti rovnoběžná s osou rotace. Takovou situaci mohou představovat dva body o hmotnosti  $m_n$  v rovině, která je kolmá k ose rotace a umístěná v těžišti rotoru. Situace je zakreslena na obr. 4.1.

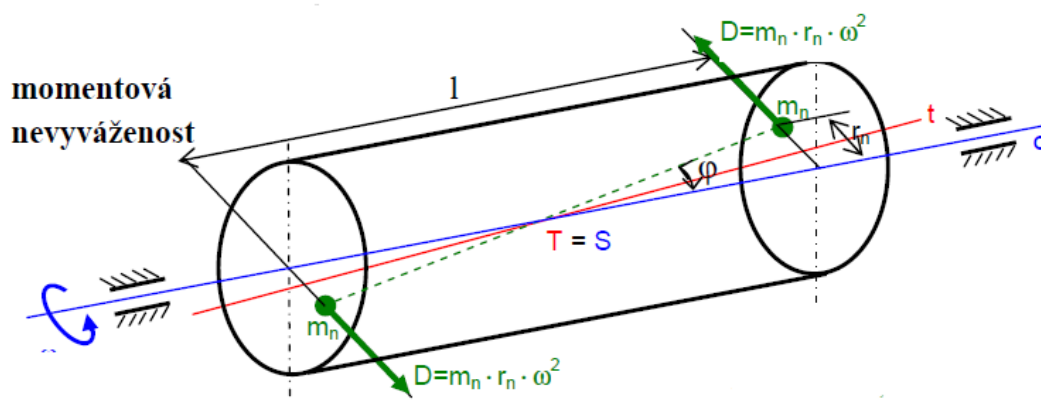


**Obr. 4.1** Statická nevyváženost [3]

Klidová poloha rotoru pak zaujímá pozici, kdy jsou tyto body pod osou rotace. V praxi může ke statické nevyváženosti dojít, když je průměr hřídele mnohonásobně větší než její délka. Většinou je tento typ nevyváženosti doprovázen jiným typem a jde pak o obecnou nevyváženost. [3][4][5]

- **Momentová nevyváženost**

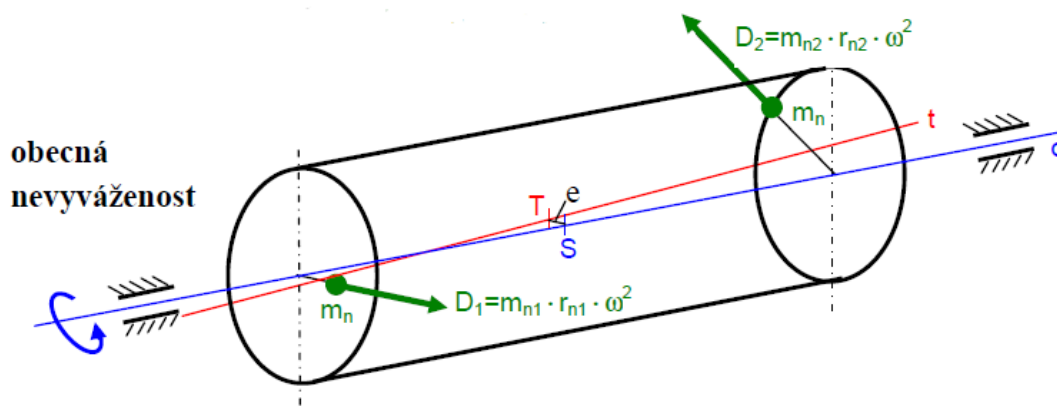
U tohoto typu nevyváženosti dochází k tomu, že osa setrvačnosti je různoběžná s osou rotace, na které se zároveň nachází těžiště rotoru. Obr. 4.2 ukazuje momentovou nevyváženost. Dva body o hmotnosti  $m_n$  se nacházejí na ose, vychýlené o poloměr  $r_n$ . Tyto body jsou vůči sobě symetrické. V případě, kdy je rotor v klidové poloze, momentová nevyváženost rotor do pohybu neuvede. Pokud je však rotor v pohybu, dochází k projevu dvojice odstředivých sil ve formě vychýlení setrvačné osy.



Obr. 4.2 Momentová nevyváženost [3]

- **Obecná nevyváženost**

Tento druh nevyváženosti je tím nejznámějším a v podstatě je to kombinace statické a momentové nevyváženosti. Dochází k ní, když je setrvačná osa mimoběžná s osou rotace. Jako v předchozím případě zobrazuje princip obecné nevyváženosti obr. 4.3. Dva body o hmotnosti  $m_n$ , mají libovolnou polohu a v důsledku toho vznikají odstředivé síly  $D_1$  a  $D_2$ . Minimalizace nebo úplné odstranění nevyváženosti se provádí na vyvažovačce přidáním nebo ubráním materiálu podle předepsaných postupů.[5]



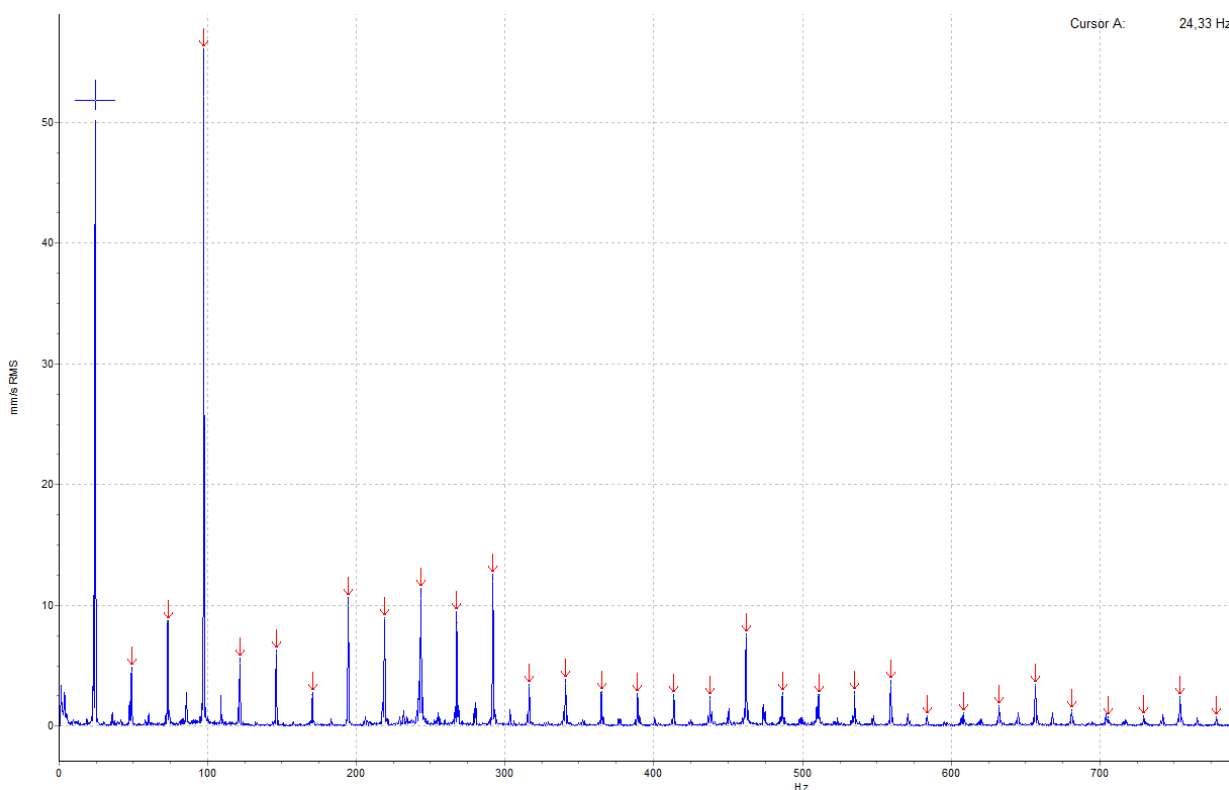
Obr. 4.3 Obecná nevyváženost [3]

- **Diagnostika nevyváženosti**

Nevyváženost lze diagnostikovat pomocí frekvenčního spektra a také pomocí fáze. Ve frekvenčním spektru se projevuje vysokou hodnotou amplitudy rychlosti otáčkové provozní frekvence, zobrazené na obr.4.4. Je to způsobené tím, že odstředivá síla rotoru se otáčí stejně a vyvolává

mechanické kmitání o stejné frekvenci. U měření nevyváženosti se upřednostňuje měřit vibrace v radiálním směru, tedy ve vertikálním a horizontálním. Při detekci nevyváženosti by se měly velikosti amplitud v těchto směrech rovnat, popřípadě jejich rozdíl velikosti může dosahovat poměru 3:1. Dále by se nevyváženost neměla projevovat v axiálním směru. Pokud tomu tak je, ve frekvenčním spektru se nachází ještě závada jiného typu.

Na otáčkové frekvenci se mohou vyskytovat také jiné druhy poruch, a tak pro absolutní jistotu se diagnostika této poruchy dá potvrdit pomocí analýzy fáze. Při měření na ložiskovém stojanu musí být fázový rozdíl mezi horizontálním a vertikálním měřením  $90^\circ$ . Přípustná hodnota odchylky může být  $\pm 30^\circ$ . Pokud se úhel blíží  $0^\circ$  nebo  $180^\circ$ , je pravděpodobně zdrojem poruchy mechanické uvolnění nebo rezonance. [3][4][5]



**Obr. 4.4** Frekvenční spektrum nevyváhy

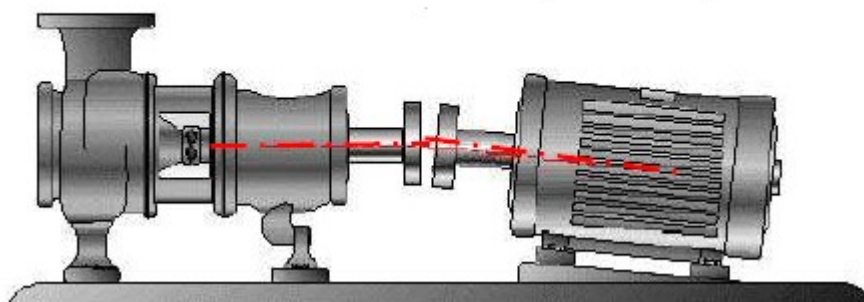
### 4.1.2 Nesouosost

Jedná se o další stav, který je nežádoucí a pokud se mu nezabrání, dojde k destrukci dalších podstatných částí stroje. Tato závada je způsobena nesprávným ustavením stroje. Pokud tedy není hřídel motoru souosý s hřídelí hnaného zařízení, dochází k nesouososti. Z hlediska ustavení lze rozdělit příčiny poruchy tohoto druhu na dvě základní skupiny.[3][5]

- ustavení samotného rotoru ve statoru stroje
- ustavení soustrojí (motor, hnané zařízení), spojené spojkou

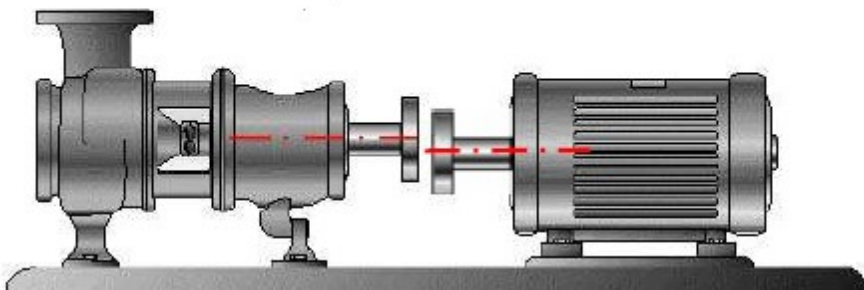
Pokud dojde k nesouososti vznikají nežádoucí jevy ovlivňující výkon a životnost strojů. Výkon je snižován, jelikož ve stroji dochází ke změnám vůle. Výkon se dále ztrácí na spojce ve formě tepelných ztrát a tím pádem se zvětšuje příkon stroje. Vzhledem ke zvýšeným silám na spojce v různých směrech dochází k nadměrnému opotřebování ložisek, ucpávek a také samotné spojky. Vše je doprovázeno hlukem a vibracemi. Při dlouhotrvající poruše dochází ke vzniku nových závad. [3][9]

Nesouosost se dělí na dvě základní kategorie. První je tzv. úhlová nesouosost, která vzniká na základě různoběžných os hřídelů. Typická úhlová nesouosost je na obr. 4.5.



**Obr. 4.5** Úhlová nesouosost [3]

Druhou kategorií je paralelní nesouosost (radiální), kde jsou osy obou hřídelů posunuty rovnoběžně. Paralelní nesouosost je zobrazena na obr. 4.6.



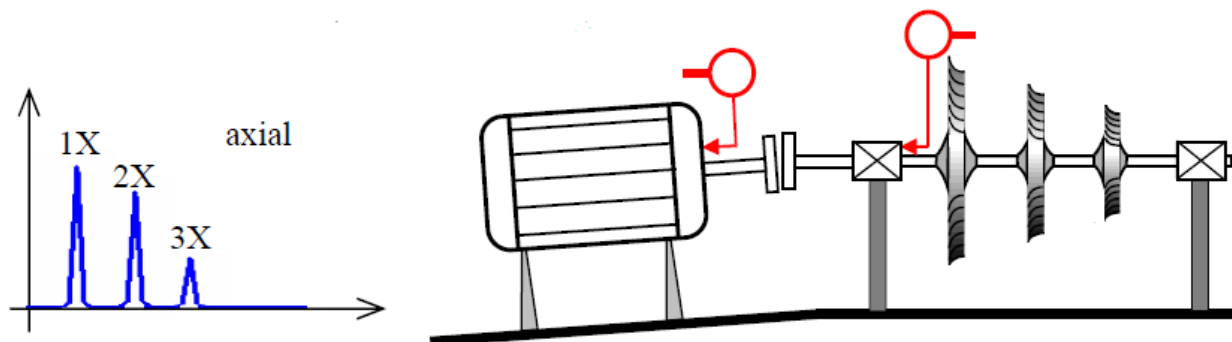
**Obr. 4.6** Paralelní nesouosost [3]

Pro ustavení je tedy kladen velký důraz. Především pak na tolerance základů ve formě podložek, maximální dovolené vyosení hřídele a volba spojky z hlediska materiálových vlastností, konkrétně například tepelné roztažnosti. [6][9]

- **Diagnostika nesouososti**

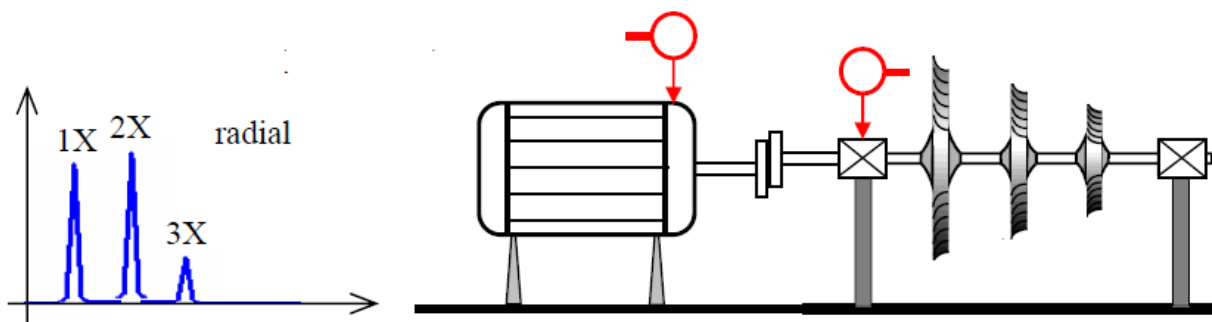
Pomocí kombinace analýzy frekvenčního spektra a rozdílu fáze lze diagnostikovat úhlovou nesouosost. Ta vyvolává v axiálním směru měření vibrace, které se nejvíce projevují na otáčkové frekvenci a jejích harmonických násobcích. Převážně pak vysokými amplitudami na první a druhé harmonické. Taktéž může jít i o poruchu spojky, projevující se dominantní frekvencí jinou než první.

Rozdíl fází by při úhlové nesouososti měl přes spojku nabývat  $180^\circ$ . Frekvenční spektrum i fázový rozdíl načrtnutý pomocí červených ciferníků je na obr. 4.7. [9][5]



**Obr. 4.7** Diagnostika úhlové nesouososti

Pro analýzu paralelní nesouososti je frekvenční spektrum a rozdíl fází podobný. Co je ale jiné, je radiální směr, ve kterém se vibrace projevují. Amplituda na druhé harmonické frekvenci otáčení je obvykle větší než u první. Velikost amplitud harmonických násobků otáčkové frekvence je závislá také na typu a konstrukci spojky. Přes spojku je pak rozdíl fází  $180^\circ$ . Pokud dojde k velkému působení nesouososti, vznikají ve frekvenčním spektru další harmonické vyšších řádů s vyššími amplitudami. Názornost takového spektra a fázového rozdílu v podobě červených ciferníků zobrazuje obr. 4.8. [3] [9]



**Obr. 4.8** Diagnostika paralelní nesouososti

### 4.1.3 Poškození valivých ložisek

Valivá ložiska jsou součástí většiny strojů a rotujících strojních zařízení. Účel ložiska ve stroji je snížit tření rotující části stroje. V dnešní době je na životnost ložisek kladen velký důraz. Jejich konstrukce a výroba podléhá přísným tolerancím, které zajišťují bezporuchový provoz. I přes tuto skutečnost je jejich životnost omezena v důsledku několika faktorů. [8][10]

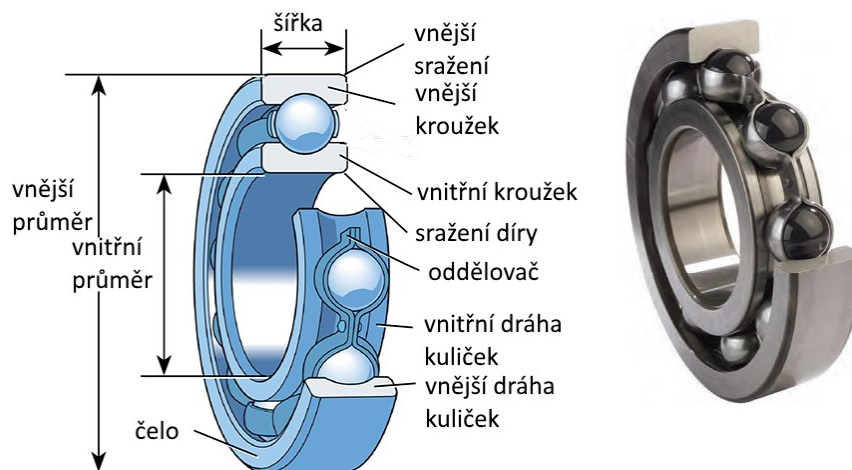
- nadměrné vibrace, vysoké zatížení
- nedostatečné mazání, špatná volba maziva
- výskyt znečištění, jiných částic v ložisku
- parazitní vlhkost v ložisku
- dlouhodobé stání stroje, poruchy při dopravě – brinelování

- nevyváženost, nesouosost, špatná montáž
- ložiskové proudy

Kdyby tyto faktory byly potlačeny v podobě správné údržby, životnost ložisek by odpovídala jejich předepsané hodnotě. Vzhledem k náročným provozním podmínkám je velmi složité všechny tyto faktory omezit u každého pohonu. Poruchy tedy bez jakéhokoliv monitorování mohou nastat kdykoliv. Právě ložiska jsou součástí strojů, na kterých se projeví většina nedokonalostí. Proto je vibrační diagnostika ve velkém měřítku zaměřena především na měření vibrací ložisek. [3][7]

### • Konstrukce valivých ložisek

Valivé ložisko má několik součástí, které jsou popsány na obr. 4.9. Na tomto obrázku se nachází kuličkové ložisko, což je jeden z druhů. Další druhy valivých ložisek se poté dělí, podle typu valivého elementu, kterým může například být váleček, jehlička, kuželík, soudeček asymetrický anebo symetrický. [3]



**Obr. 4.9** Konstrukce valivého ložiska

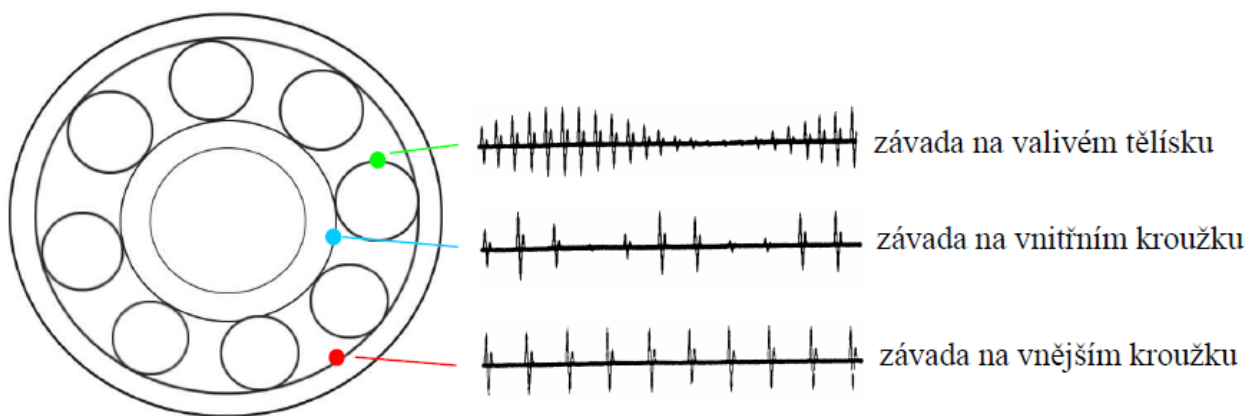
### • Diagnostika valivých ložisek

Ve vibrační diagnostice valivých ložisek se využívá převážně měření a analýza frekvenčních spekter. Ložiska generují celkem tři druhy podstatných frekvencí, kterým se diagnostika věnuje.

- náhodné frekvence v ultrazvukovém pásmu
- frekvence poruch daných konstrukcí ložiska
- vlastní frekvence ložisek

Náhodné frekvence v ultrazvukovém pásmu frekvencí v rozsahu 5000 Hz – 60 000 Hz se zjišťují pomocí měření hned několika metod. Všeobecně se tyto metody nepoužívají v běžné pravidelné vibrodiagnostice ve výrobních podnicích. Jmenovitě se jedná o metody jako například SEE, HDF nebo Shock Pulse. Každá z těchto metod napomáhá k rozhodnutí o stavu ložiska společně s daty z měřeného frekvenčního spektra a jiných parametrů. [3][12]

Dalším druhem vyvolaných frekvencí jsou frekvence poruch daných konstrukcí ložiska. Tyto závady jsou závislé na otáčkách stroje, a tedy i ložiska, na rozměrech ložiska a počtu valivých elementů. Pokud jsou všechny tyto parametry známy, lze vypočítat čtyři základní charakteristické poruchové frekvence. Místo, kde porucha vzniká, má vlastní vzorec pro poruchovou frekvenci. Níže je popsáno místo, včetně vzorce pro danou frekvenci. Místa jednotlivých závad jsou na obr. 4.10. [3] [11]



Obr. 4.10 Závady částí ložiska [3]

- porucha na valivém tělísku

Tento druh závady je zobrazen zelenou barvou na obr. 4.10. Jedná se o závadu, která se projevuje při každém kontaktu vnitřního a vnějšího kroužku. Velikost odezvy pak závisí na tom, jestli interakce mezi valivým elementem a kroužky probíhá v místě zatížení ložiska. Charakteristickou frekvencí této závady popisuje vzorec (14). [3][10]

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left( 1 - \left( \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right)^2 \right) \cdot n \quad (14)$$

- porucha na vnitřním kroužku

Vybuzení vibrací ložiska může zapříčinit také poruchy na vnitřním kroužku. Pokud je vnitřní kroužek nalisován na hřídeli stroje, vzniká odezva ve formě vibrací při každém styku vnitřního kroužku a valivého elementu. Velikost vibrací pak závisí na tom, jestli dojde ke kontaktu v zatížené nebo nezatížené oblasti ložiska.[3] [13]

$$BPFI = \frac{N}{2} \left( 1 + \left( \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \right) \cdot n \quad (15)$$

- porucha na vnějším kroužku

Analogicky jako u předchozích poškození jednotlivých částí ložiska vznikají také vibrace v důsledku závady na vnějším kroužku a sice v okamžiku, kdy valivý element rotuje přes

závadu na kroužku. Místo možného styku pak na obr. 4.10 vyznačuje červená barva. Charakteristickou frekvenci této závady určuje vzorec (16). [3][10]

$$BPFO = \frac{N}{2} \left( 1 - \left( \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \right) \cdot n = N \cdot FTF \quad (16)$$

- porucha na kleci

Tato závada má rovněž svoji charakteristickou frekvenci, kterou lze spočítat. Klec má za úkol držet valivé elementy v rozestupech a umožňovat jim rotační pohyb. [3][10]

$$FTF = \frac{1}{2} \left( 1 - \left( \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \right) \cdot n \quad (17)$$

kde:  $n$  ... otáčky rotoru [Hz]

$B_d$  ... průměr valivého prvku [mm]

$P_d$  ... roztečný průměr

$\varphi$  ... kontaktní úhel

Všechny vzorce poukazují na skutečnost, že tyto frekvence jsou násobky otáčkové frekvence. Nikoliv však celočíselné harmonické násobky, což je v tomto případě výhodou, protože při analýze je diagnostik nemůže splést s frekvencemi jiných poruch. V dnešní době jsou všechny charakteristické frekvence spočítané výrobcem ložisek a uvedené v katalogu. Při frekvenční analýze je třeba znát otáčkovou frekvenci. Poté mohou být v softwaru určeném pro analýzu dat dopředu nastavené hodnoty těchto frekvencí. Především se toho využívá při aplikaci obálkové metody u analýzy demodulačních spekter, která se používají jako první k objevení ložiskových závad. Právě v demodulačním spektru je možné zachytit zárodky závad a sledovat tak jejich vývoj. Právě takový druh včasného zjištění poruchy může diagnostika upozornit, že se něco se strojem děje. Nicméně ložiska mají svoji životnost a jejich poškození, či zničení je nevyhnutelné. [3][8][13]

V průběhu vývoje závad ložisek lze sledovat zvýšení amplitud frekvencí jednak v demodulačním spektru, jednak ve spektru naměřeného zrychlení. Postupně vznikají okolo těchto amplitud postranní pásma s odstupem poruchové frekvence ložiska. Rozhodnutí, kdy by se ložiska měla vyměnit, aby nedošlo k poruše nebo odstávce, je u každého stroje individuální a záleží na druhu jeho provozu a také na jeho velikosti. Posledním stádiem ložiska je období, kdy se amplitudy charakteristických frekvencí objevují ve spektru rychlosti. Rovněž pokud se zde vyskytují postranní pásma. V takovém případě je nezbytné upozornit výrobní podnik, aby ložiska vyměnil a zamezil tak odstávce výroby.[9]



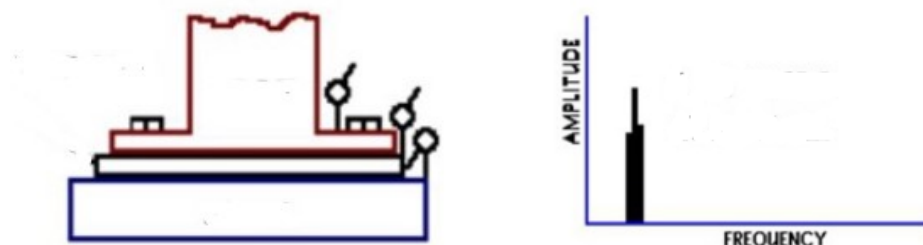
### • Další druhy poškození ložiska

Kromě závad, které jsou pospány výše s výpočtem charakteristických frekvencí jsou ložiska podrobeny dalším nežádoucím skutečnostem. Jednou z nich je doplňování maziva. Při nerovnoměrném nebo také nedostatečném doplňování se ložisku výrazně zkracuje jeho životnost. Tento stav také podporuje vznik dalších závad anebo zhoršení již vzniklých. Při nedostatečném doplňování maziva ložisko dře a opotřebovává se. Vznikající závalu doprovází charakteristický zvuk ložiska, který negativně zvyšuje hlučnost. Ložisko se otáčí stále s mazivem, které bylo dodáno při výrobě nebo opravě stroje. Důležitá je jeho výměna, tak aby se staré dostalo z ložiska ven a nové do ložiska. Na druhou stranu se volba množství maziva na doplnění musí volit rozumně. Pokud totiž bude maziva v ložisku hodně, dostává se například do rotující části stroje a tím pádem i vinutí stroje. Taková skutečnost negativně ovlivňuje izolační stav vinutí stroje a také jeho životnost.[4] [9]

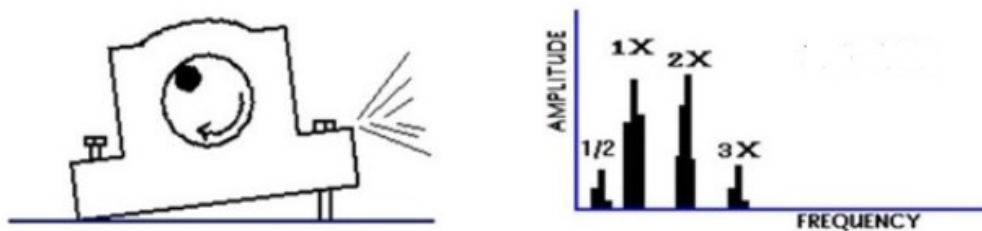
Jiným poškozením může být například vliv ložiskových proudů, o kterých bude podrobněji pojednáno v kapitole o poruchách způsobenými elektrickými příčinami. Ve výrobních závodech je uskladněno zpravidla více záložních motorů různých druhů výkonů a velikostí z důvodu zálohy v případě rychlé výměny při odstávce anebo při plánované odstávce. Tyto motory mohou stát na stejném místě v řádech jednotek let. Ložiska jsou v důsledku působení gravitační síly zatěžovány ve stejné poloze. Může dojít k otisku valivých elementů do dráhy ložiska a zapříčinění dřívějšímu budoucímu poškození. Pro minimalizaci těchto projevů je třeba v několikrát v roce hřídel motoru otáčet a měnit tím polohu vlastní zátěže stroje na ložisko. [2][8][9]

#### 4.1.4 Mechanické uvolnění

Tento druh závady je způsoben hned několika příčinami, které souvisí s upevněním stroje ke frémě. Především pak v důsledku konstrukčních uvolnění patky stroje v důsledku špatného dotažení šroubů, uvolnění podložek pod patkami anebo destrukce frémy. Tyto závady jsou spojeny s poškozením nazývaným se měkká patka. Projevují se ve frekvenčním spektru zvýšením amplitudy otáčkové frekvence při upevnění snímače v radiálním směru. Ve fázovém rozdílu by se tento druh závady měl projevit rozdílem od  $90^\circ$  do  $180^\circ$  mezi body ve vertikálním směru na patkách stroje nebo šroubech. Mechanické uvolnění zapříčiňuje výskyt velkého počtu harmonických složek ( $1X$ ,  $2X$ ..), subharmonických složek ( $2/3X$ ;  $1/2X$ ..) a interharmonických složek ( $1,5X$ ;  $2,5X$ ..). [3][9]



*Obr. 4.11 Mechanické uvolnění*



**Obr. 4.12** Měkká patka

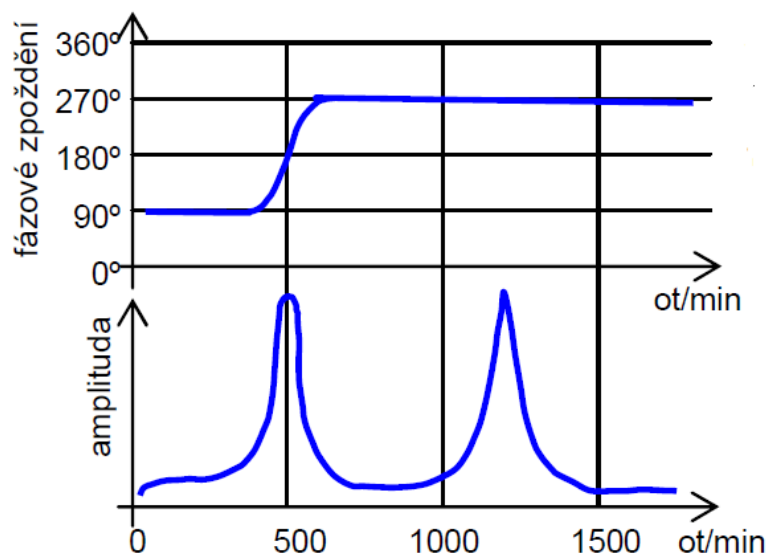
#### 4.1.5 Rezonance

Obecně rezonance rotačních částí stroje není závada, ale přirozená vlastnost. Každý otáčející prvek má svoji vlastní frekvenci. Pokud se otáčková frekvence shoduje nebo je blízká této vlastní frekvenci dochází k rezonanci. Otáčky odpovídající vlastní frekvenci se nazývají kritické otáčky. Jelikož jsou rotační části vyrobeny z oceli, dochází až k několikanásobnému zvýšení amplitud kmitání na kritických frekvencích v důsledku menšího tlumení. Vzhledem k samobuzenému zesílení, o kterém se pojednává v kapitole 1.2, může dojít k zesílení kmitání, které způsobí destrukci stroje. Hodnota budící síly, která tuto destrukci jejím zvýšením vyvolá, přitom nemusí být vysoká. Z tohoto důvodu je zapotřebí, aby konstrukce stroje byla navržena tak, aby provozní nebo jmenovité otáčky stroje byly frekvenčně vzdáleny těm kritickým. Každý rotor má několik vlastních frekvencí. Teoreticky nekonečně mnoho vlastních frekvencí a tím pádem i kritických otáček. Všechny jsou závislé na tuhosti materiálů rotujících částí anebo na tuhosti podpor, které se mění s otáčkami stroje, což komplikuje návrh, ale také diagnostiku. V amplitudo – fázové charakteristice lze spatřit vliv rezonance. [3][9]

- **Rozpoznání rezonance**

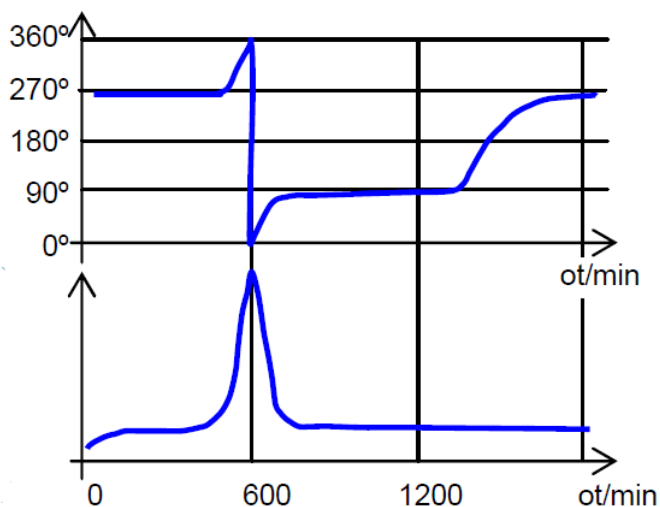
V amplitudo – fázové charakteristice na obr. 4.13 lze spatřit vliv rezonance ovlivňující velikost amplitudy a fáze. Tyto průběhy jsou zjednodušené a pouze ilustrují důležitost fáze anebo amplitudy. Rozdílnost rychlosti změn fáze je závislá na tuhosti, tudíž i na tlumení. U valivých ložisek je tlumení nižší, tudíž je změna rychlosti velká. Naopak je tomu u kluzných ložisek, kde dochází k většímu tlumení díky olejovému filmu.

Na obr. 4.13 v amplitudové charakteristice se zdá, že rotor má dvě kritické otáčky. Při posouzení společně s fázovým spektrem, je tento úsudek klamný. U rozpoznání rezonančních kritických otáček rozhoduje především fázová charakteristika, ve které je vidět pouze jedna změna, tudíž v rozsahu 1500 ot./min má rotor jednu kritickou frekvenci. [3][9]



Obr. 4.13 Rozpoznání rezonance [3]

Pro potvrzení skutečnosti, že fáze je rozhodujícím aspektem k rozpoznání kritických otáček, je zde přiložen graf obr. 4.14. Na amplitudové charakteristice je výrazná pouze amplituda na prvních kritických otáčkách. Naproti tomu lze vidět v průběhu fáze změny dvě, které signalizují dvě různé kritické otáčky.

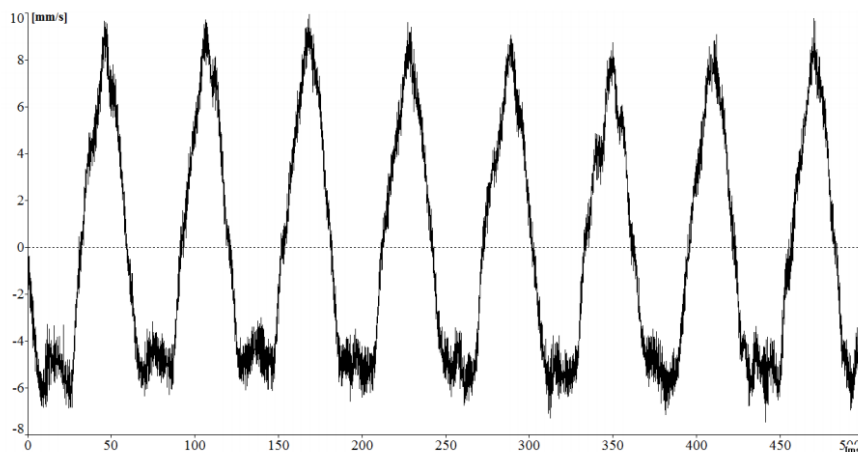


Obr. 4.14 Spektrum a fáze rezonance [3]

#### 4.1.6 Přidírání rotoru

Obecně lze říci, že přidírání rotoru v elektrickém stroji, což vlastně prakticky znamená kontakt mezi rotorem a statorem v průběhu otáčení, je způsobeno například nevyváhou rotoru. Tato nevyváha, může mít celou řadu příčin. Z mechanického hlediska je přidírání rotoru důsledek působení elektrických a mechanických vlivů. Obvyklými jsou například ohnutí rotoru, jeho házivostí anebo v důsledku místního ohřevu. Také může přispět špatné usazení rotoru anebo opotřebení rotoru. Na druhou stranu problém přidírání nemusí mít pouze příčinu změny rotoru ale také statoru. Může dojít k mechanickému uvolnění plechů anebo klínů ve statoru, které způsobí vzhledem k rotaci další poškození.

Samotná diagnostika přidírání rotoru je pomocí frekvenčního spektra obtížná, protože způsobuje zvýšení amplitud na první harmonické frekvenci, na subharmonických frekvencích a také na interharmonických frekvencích. Takové spektrum se může plést například s poruchou mechanického uvolnění, která je popsána výše. Tato práce je směřována především na diagnostiku pomocí frekvenčních spekter, nicméně v diagnostice bývá opomíjena také analýza naměřeného časového signálu. Právě v těchto naměřených průbězích lze poruchu přidírání společně s frekvenčním spektrem potvrdit. Jeden z takových průběhů je na obr. 4.15. Lze zde zpozorovat rozdíl mezi špičkami půlvln, kde ořezaná půlvlna značí přidírání rotoru o stator. [3][9][11]



**Obr. 4.15** Časový signál rychlosti vibrací

### 4.1.7 Ozubené a řemenové převody

- **Ozubená soukolí**

U ozubených soukolí je kladen důraz především na kvalitu konstrukce a kvalitu výroby. Jejich odezvy ve formě vibrací a hluku jsou časté a závislé na několika faktorech. A sice pokud zuby soukolí vstupují a vystupují ze záběru s konstantní periodou, pokud není dodržena soustřednost kružnic popisující ozubení, pokud je každý zub a mezera vyroben s jinou odchylkou anebo pokud se například mění tuhost soukolí. Tyto faktory zase způsobují další poškození vytvořené na zubech. Poškození lze rozdělit na lokální a distribuované. U lokálních závad jde o konkrétní závadu na zubu, například pitting. Naproti tomu distribuované závady jsou přenášeny na ostatní zuby například u nesouososti ozubení. Všechny tyto závady se projevují celkem výrazně v naměřených frekvenčních spektrech zrychlení. Níže jsou uvedeny vzorce pro výpočet frekvencí poruch zubu. [9][11]

$$f_{z1} = z_1 \cdot f_{R1} \quad (18)$$

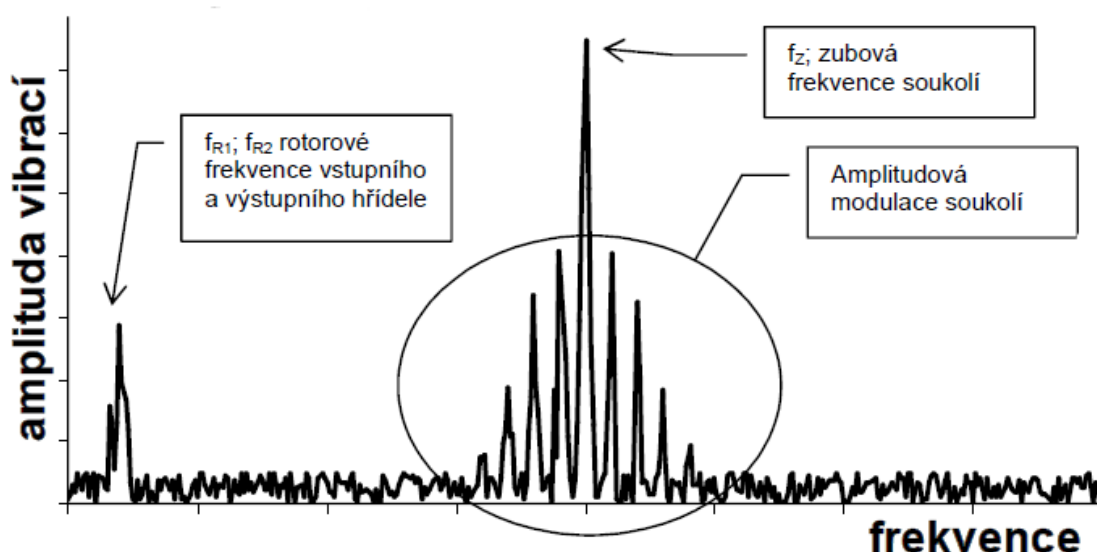
$$f_{z2} = z_2 \cdot f_{R2} \quad (19)$$

kde

$z_1, z_2$  počet zubů kol

$f_{R1}, f_{R2}$  rotorové frekvence kol

Kolem těchto zubových frekvencí vznikají také postranní pásma s odstupem rotorové frekvence pastorků. Ilustrace frekvenčního spektra se závadou na zubu je vidět na obr. 4.16.

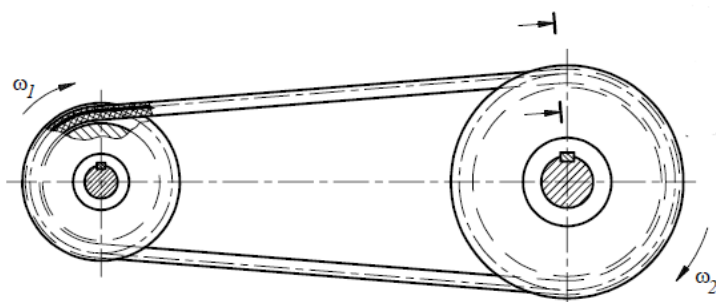


Obr. 4.16 Spektrum vibrací převodovky [11]

Při dalším vývoji poruchy se vytváří ve frekvenčním spektru druhé a třetí harmonické zubové frekvence. Vzhledem k tomu, že při zhoršení závady se projevují více harmonické frekvence v porovnání se základní zubovou frekvencí, je důležité, aby byl nastaven frekvenční rozsah za třetí harmonickou frekvenci zubové frekvence. U složitějších převodovek, které se skládají z více soukolí je analýza frekvenčních spekter daleko složitější a využívá se zde keprální analýza. [11]

### • Řemenové převody

U řemenových převodů je situace obdobná, jako u ozubených. Vibrace vznikají v důsledku několika příčin. Především pak v důsledku klínového řemenového převodu, který je ovlivněn opotřebením řemenice a také její samotnou výrobou a provedením. Konkrétně se jedná o nestejnoměrnou šířku řemene vůči jeho délce. Dochází ke změně převodu, jelikož se řemenice a řemen stýká na proměnlivém průměru. Pokud se jedná o ideální řemen s řemenicí, jsou dány poruchové frekvence následujícími vztahy. [9] [11]



Obr. 4.17 Schéma řemenového převodu

$$f_{RP} = f_{R1} \cdot \frac{\pi D_1}{L} \quad (20)$$

$$f_{RP} = f_{R2} \cdot \frac{\pi D_2}{L} \quad (21)$$

kde

$D_1$ ... průměr hnací řemenice	$[mm]$
$D_2$ ... průměr hnané řemenice	$[mm]$
$f_{R1}$ ... rotorová frekvence hnací řemenice	$[Hz]$
$f_{R2}$ ... rotorová frekvence hnané řemenice	$[Hz]$
$L$ ... délka řemene	$[mm]$

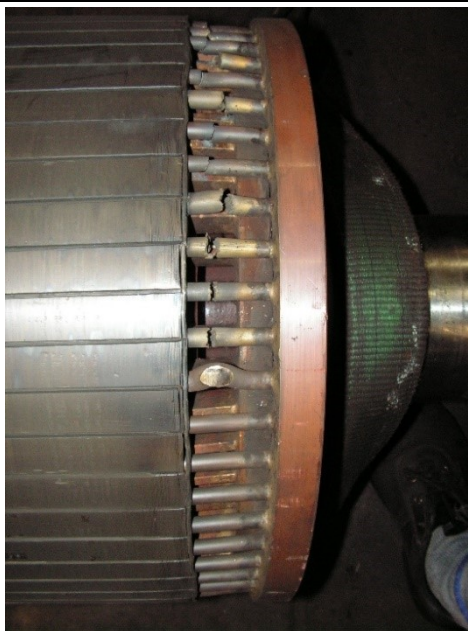
Vzhledem ke skutečnosti, že řemenový převod není ideální, vyskytují se ve frekvenčních spektrech rotorové frekvence a řemenové frekvence s jejími vyššími harmonickými. Dalšími příčinami je například kmitání řemene v odlehčené větvi anebo nevyváženost a excentricita řemenice. Samozřejmě, že vibrace se mění postupně v závislosti na stáří a kvalitě řemene, počtu rozběhů, čistotě a teplotě prostředí. [9][11]

## 4.2 Elektromagnetické poruchy

Závady elektromagnetických příčin se týkají elektrických motorů. Tato práce se bude zabývat převážně pak asynchronních motorů s kotvou nakrátko, které jsou využívány jako hlavní druh pohonu v papírenském a chemickém průmyslu. Elektrické motory podléhají závadám jako přerušení rotorových tyčí, ložiskovým proudům, zkratování plechů statoru a rotoru nebo nevyváženým odporům fází. Vibrace způsobené elektromagnetickými silami také závisí na poměru statorových a rotorových drážek, jejich natočení, odolnosti míst, kde dochází ke zvýšenému namáhání. Některé poruchy se projeví ve vibračních spektrech, což závisí také na vývoji závady. Proto je pro diagnostiku lepší kombinovat frekvenční spektra vibrací s frekvenčními spektry statorových proudů. V této části práce tedy bude uvedena charakteristika postupu odhalování elektromagnetických závad v doplnění proudových frekvenčních spekter anebo jiných elektrických testů. [3][5]

### 4.2.1 Poruchy rotorových tyčí a prstenců

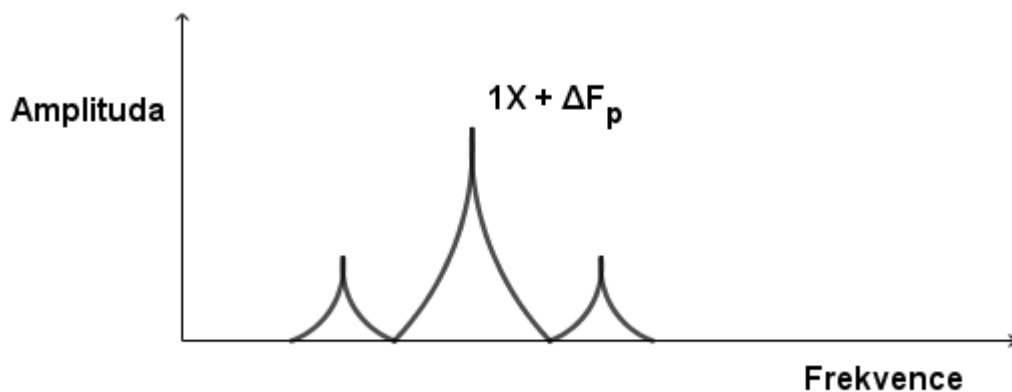
Závažný problém asynchronních motorů je přerušení rotorové tyče. K takovému poškození může dojít v důsledku únavy materiálu. Na obr. 4.18 lze vidět přerušení hned několika rotorových tyčí. Takový rotor při jmenovitých otáčkách téměř  $3000 \text{ min}^{-1}$  má velký moment setrvačnosti, což se projeví vzhledem k velkému skokovému zatížení stroje. Přerušení tyčí pak nastane vlivem mechanického rázu, kterému podlehnou slabá místa opotřebeného materiálu. Opotřebení může nastat v důsledku tepelných vlivů a sice změně tuhosti materiálu anebo dochází k častým ale malým mechanickým rázům. [10]



**Obr. 4.18** Přerušení rotorové tyče

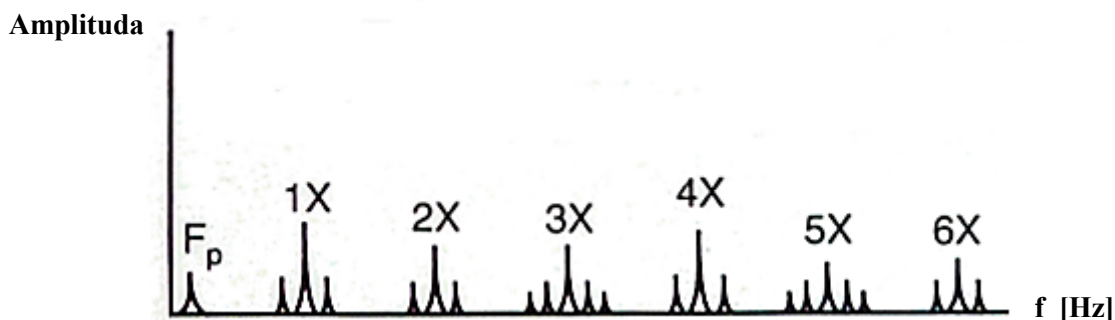
Co se týče diagnostiky vibračních frekvenčních spekter, může být v této podkapitole zařazeno také poškození koncových prstenců, nedokonalé spoje mezi rotorovými tyčemi a koncovými prstenci nebo zkratované rotorové plechy.

Přerušení rotorové tyče se projevuje ve frekvenčním spektru zejména na první otáčkové frekvenci, jelikož se síla způsobující vibrace otáčí stejně jako rotor. Kolem otáčkové frekvence se pak vytvářejí postranní pásma s frekvencí od průchodu pólů, označovanou jako  $f_p$ . Postranní pásma je naměřeno z důvodu působení síly na ložiska, u kterých jsou vibrace měřeny v radiálním směru na ložiskovém štítu. Ilustrace frekvenčního spektra se pak nachází na obr. 4.19. [3][9][10]



**Obr. 4.19** Spektrum přerušení rotorové tyče

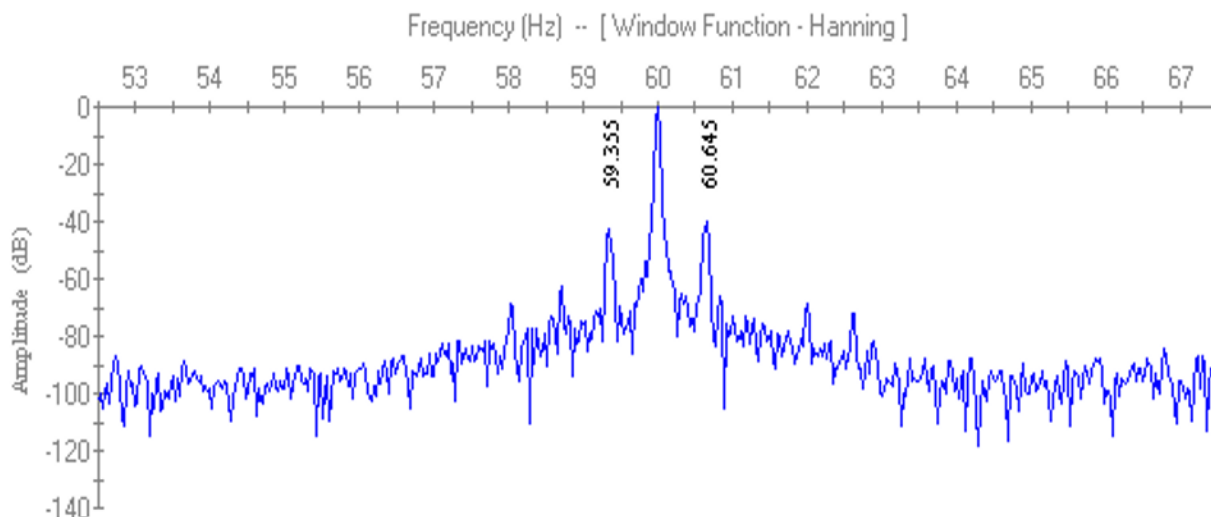
Pokud se porucha zhoršuje, objevují se ve spektru harmonické násobky otáčkové frekvence  $2X$ ,  $3X$ ,  $4X$ ,  $5X$  a kolem těchto frekvencí vznikají opět postranní pásma s odstupem frekvence od průchodu pólů  $f_p$ . Měření takovýchto frekvenčních spekter vyžaduje velký dynamický rozsah a frekvenční rozlišení měřicího přístroje, jelikož postranní pásma nemusí mít tak velké amplitudy, aby ve spektru vynikaly. Ilustrace takového spektra je pak na obr. 4.20. [9]



**Obr. 4.20** Vývoj závady přerušení rotorové tyče [9]

Jak bylo uvedeno v obecném pojednání o elektromagnetických poruchách, lze potvrdit poruchu způsobenou přerušením rotorové tyče frekvenčním spektrem proudu. Jakmile dojde k takové poruše, prochází ostatními tyčemi větší proud, což způsobuje větší oteplení rotoru a může dojít k jeho prohnutí. V důsledku této skutečnosti může dojít ke kontaktu se statorem a destrukci motoru. Proto je velmi důležité této poruše předejít anebo ji odhalit včas. Frekvenční analýza statorového proudu k odhalení této poruchy pomůže. Jedním z takových příkladů je frekvenční spektrum na obr. 4.21. Porucha nastala, pokud se v okolí napájecí frekvence vyskytují postranní pásma. Pokud tyto pásma mají zesílení nižší než 60 dB, rotor je v pořádku. Na grafu má pásmo zesílení větší odstup a značí poruchu rotorové tyče. Je třeba zmínit, že měření proudového spektra musí probíhat během jmenovitého zatížení stroje. Jinak se tento druh závady neprojeví. Frekvence, na které se vyskytují postranní pásma se vypočítá pomocí vzorce (22), který je uveden níže. [9]

$$f_v = v \cdot f_1 \pm 2 \cdot s \cdot f_1 \quad (22)$$

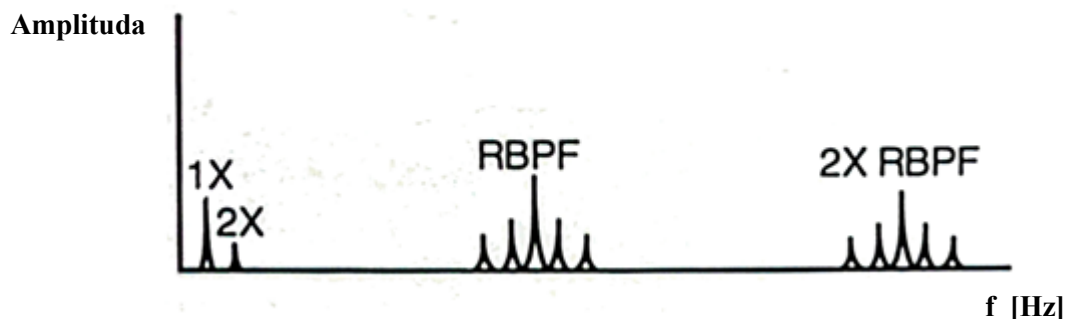


**Obr. 4.21** Frekvenční spektrum proudu

U závady způsobené uvolněním rotorových tyčí se ve frekvenčním spektru vibrací objevují trochu odlišné frekvence. Pokud se ve frekvenčním spektru objevují amplitudy na frekvencích tzv. RBPF a jejich postranní pásma jsou odsazeny o dvojnásobek síťové frekvence, jedná se o uvolnění tyčí. Frekvence RBPF je pak součin hodnoty otáček rotoru a počtu rotorových tyčí. Pokud k takové



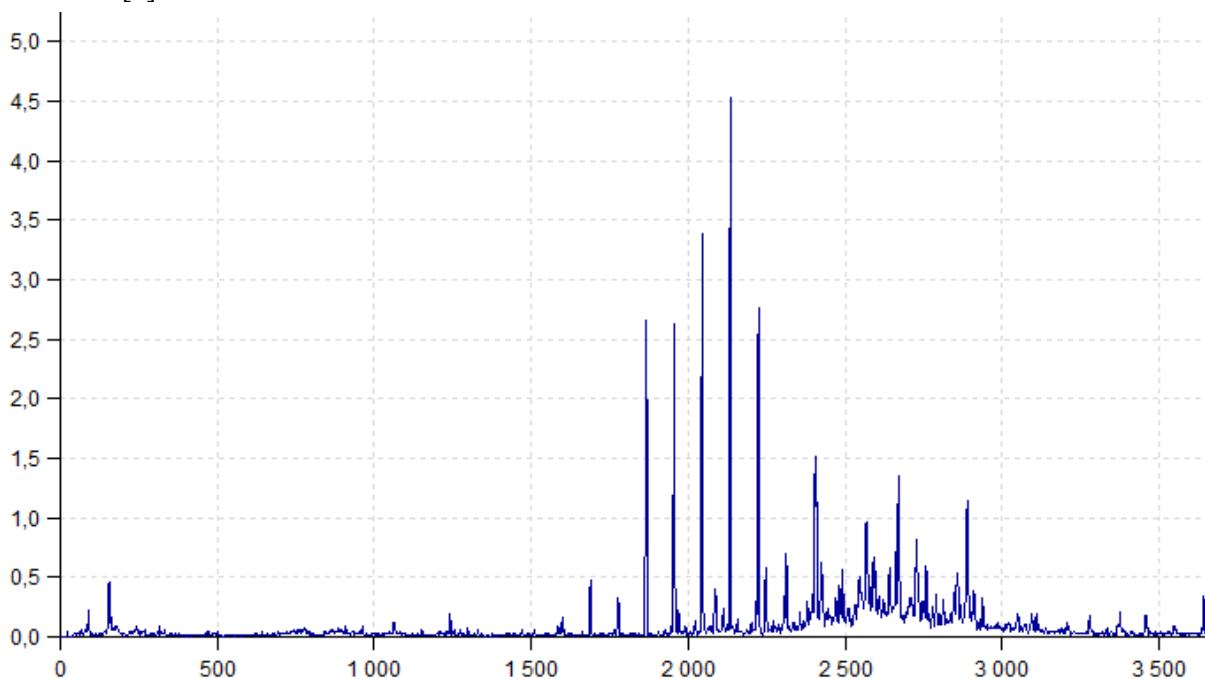
poruše dojde, dochází k jiskření mezi volnými rotorovými tyčemi a koncovými prstenci. Vibrace se projevují převážně na dvojnásobku RBPF s postranními pásy o frekvenci dvojnásobku síťové frekvence, označované také jako  $f_1$ . Pro ilustraci se náčrt takového spektra nachází na obr. 4.22. [9] [10]



**Obr. 4.22** Uvolnění rotorových tyčí [9]

#### 4.2.2 Účinky frekvenčního měniče

Z důvodu regulace asynchronních motorů se využívají frekvenční měniče. Vzhledem k napájení pomocí frekvenčních měničů jsou motory z hlediska izolace a konstrukce speciálně upraveny na rozdíl od pohonů, které regulované nejsou. Přesto má působení frekvenčního měniče vliv na celkové vibrace. Tyto vzniklé odezvy jsou ovšem přirozeným jevem a nelze je vnímat jako závadu. Nicméně zkušený diagnostik musí rozlišit zvýšené amplitudy vibrací na frekvencích odpovídajícím působení frekvenčního měniče od jiných závadových frekvencí. Tím pak zamezí zbytečným opravám anebo dalším měřením. [2]



**Obr. 4.23** Účinky frekvenčního měniče

Například je zde na grafu obr. 4.23 zrychlení vibrací v závislosti na frekvenci vidět zvýšení amplitud v oblasti vyšších frekvencí. Na první pohled se zdá, že tyto frekvence náleží ložiskovým frekvencím. Při aplikaci kurzoru postranních pásem lze odečíst frekvenční rozdíl těchto pásem. Konkrétně u tohoto spektra je frekvenční rozdíl 89,5 Hz. Teoreticky by tento rozdíl mohl odpovídat jedné z ložiskových frekvencí. Proto je nutné ověřit, jestli tomu tak opravdu je. K tomu slouží jednoduchý vzorec, který je uveden níže.

$$2p = \frac{\Delta f}{f_{ot}} \quad (23)$$

Rozdíl frekvencí frekvenčního pásma je tedy 89,5 Hz. Pokud se tento frekvenční rozdíl podělí hodnotou otáčkové frekvence, měla by vyjít hodnota počtu pólů asynchronního motoru. V tomto případě byla odečtena otáčková frekvence z frekvenčního spektra rychlosti a sice 22 Hz. Výsledek je uveden níže a je z něj zřetelné, že jde o čtyřpólový stroj.

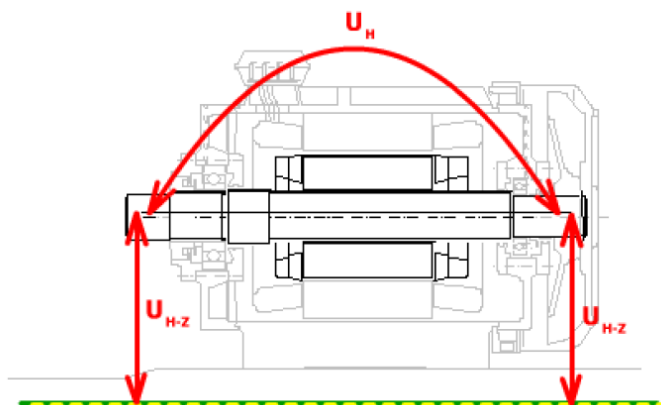
Odečítání frekvencí by mělo být co nejpresnější, aby nedošlo k omylu. V tomto případě tedy jde o frekvence odpovídající frekvenčnímu měniči, a tudíž nenastala žádná porucha ložisek.

$$2p = \frac{89,5}{22}$$

$$2p = 4,07$$

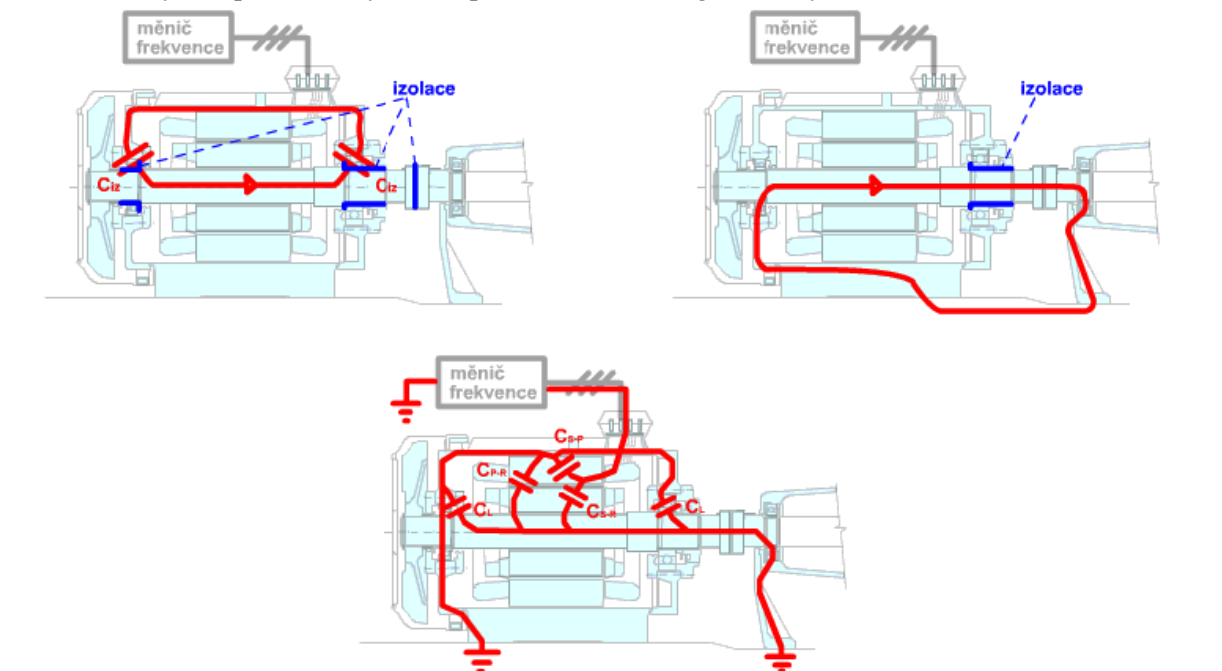
#### 4.2.3 Ložiskové proudy

V předchozí kapitole byly zmíněny účinky frekvenčního měniče. Jedním z nich je také vznik hřídelových napětí. Ve své podstatě se jedná o indukované napětí na hřídeli způsobené časovou nebo prostorovou změnou magnetického toku. Dále se ještě může na hřídeli objevit napětí vznikající vlivem rozložení elektrostatického potenciálu kapacitních vazeb. Obě jsou vidět na obr. 4.24. Tato napětí způsobují průchod proudu v částech motoru, kde by procházet neměl. Konkrétně se jedná například o kostru motoru, štíty, hřídel, ložiska anebo kapacity částí motoru proti zemi. Hřídelová napětí ovšem nezpůsobují jen frekvenční měniče. U strojů, které nenapájí frekvenční měnič se také vyskytují hřídelová napětí. Tato skutečnost však odpovídá strojům velkých výkonů nebo strojům, jejichž konstrukční vlastnosti z hlediska návrhu anebo montáže stroje jsou nedokonalé. [2][8]

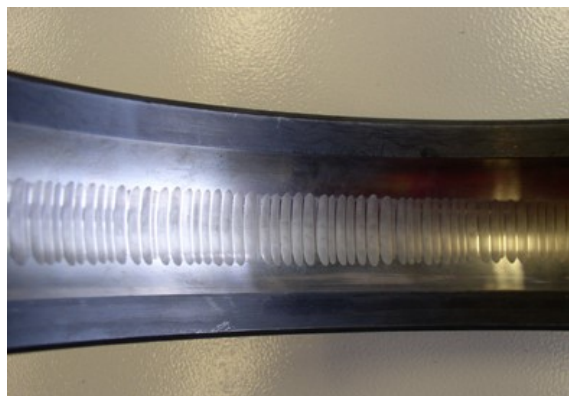


Obr. 4.24 Hřídelová napětí [2]

Příklady cest průchodu ložiskových proudů jsou na obr. 4.25. Jak je vidět, cesty takových proudů se mohou uzavírat prakticky všude. Pokud je elektrický motor napájen ze sítě, pak by měla být zaměřena pozornost k vytvoření dostatečné izolace galvanických spojů. U napájení z frekvenčního měniče se musí brát v úvahu vysokofrekvenční proudy, které protékají kapacitními vazbami. Může se také stát, že tyto kapacitní cesty budou převládat nad těmi galvanickými. [2]



**Obr. 4.25** Cesty ložiskových proudů [2]



**Obr. 4.26** Stopy na ložisku po ložiskovém proudu[8]

Aby se zamezilo ložiskovým proudům, využívají se různé způsoby izolací v motoru. Při síťovém napájení u velkých motorů stačí odizolovat pouze jedno ložisko na straně, kde není spojka. U velkých strojů je izolace provedena ve formě podložení ložiskového stojanu izolačním materiálem. Taková izolace musí být provedena dokonale a je nutné dbát na odizolování například olejových potrubí nebo neuzemňovat stojany apod. U strojů napájených frekvenčním měničem je potřeba izolovat obě ložiska a uzemnit hřídel pomocí kartáčů nainstalovaných na ní. V takovém případě pak bude vliv hřídelového napětí a napětí na hřídeli omezen. [2]

#### 4.2.4 Statická excentricita

Tento druh závady souvisí s problémy statoru. Jedná se o stacionární změnu vzduchové mezery, kterou vyvolávají měkké patky, deformovaný základ, nedokonalé vnitřní ustavení, opotřebení ložisek nebo lokální ohřev statoru. K lokálnímu ohřevu statoru dochází při zkratování statorových plechů, vyvolávající tepelnou nerovnoměrnost statoru, která vede k deformaci statoru. V důsledku takového ohřevu vznikají teplotně indukované vibrace, které s narůstající dobou provozu narůstají a deformují stator. Dalším problémem patřícím do této skupiny je tzv. volné železo. Jedná se o uvolnění nebo změnu tuhosti nosné části statoru. Nerovnoměrná stacionární vzduchová mezera tedy generuje silně směrové vibrace, které se projevují ve frekvenčním spektru převážně na druhé harmonické síťové frekvence ( $2X f_L$ ). Dále se projevují na frekvenci  $f_{se}$ , která je závislá na počtu drážek rotoru a skluzu. Ilustrace spektra s vyznačenými frekvencemi je na obr. 4.27. Níže je také uveden vzorec, který charakterizuje veličiny ovlivňující statickou excentricitu. [3][9]

$$f_{se} = f_1 \left[ k \cdot Q_R \frac{1-s}{p} \pm v \right] \quad (24)$$

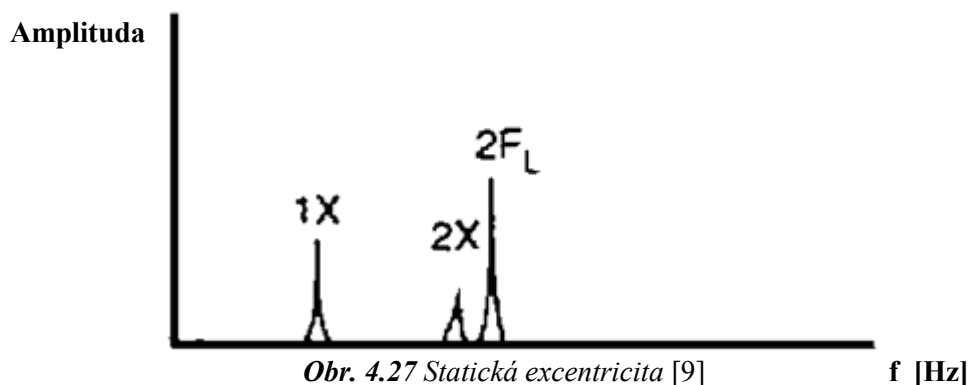
Kde

$f_1$  ...síťová frekvence [Hz]

$k$  ... 1,2,3,,, [–]

$Q_R$  ... počet drážek rotoru [–]

$s$ ... skluz	$[-]$
$p$ ... počet pólových dvojic	$[-]$
$v$ ... 0,2,4,6,8...	$[-]$



#### 4.2.5 Dynamická excentricita

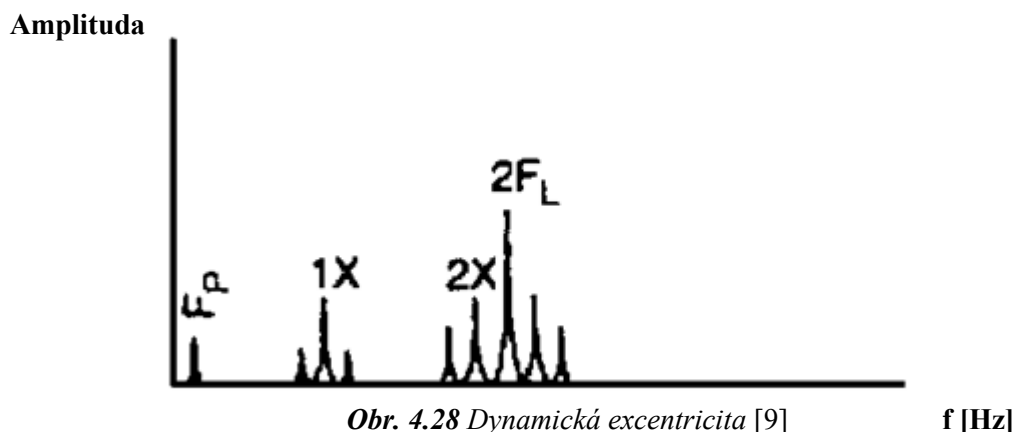
Tento druh excentricity je způsoben závadami rotoru, které zapříčiní proměnnou vzduchovou mezeru mezi rotorem a statorem. U statické excentricity byla změna vzduchové mezery statická a šířka vzduchové mezery se neměnila v prostoru a nebyla závislá na čase. U dynamické excentricity je situace představitelnější, avšak mnohem složitější. Šířka vzduchové mezery je zde funkcí polohy, ale také času. Je to z důvodu otáčení proměnné vzduchové mezery otáčkovou frekvencí rotoru. [3][9]

Excentricita rotoru může tedy být způsobena vlivem nelinearity magnetické křivky  $B(H)$ , ohnutím rotoru, házivostí anebo ohřátím rotoru na lokálním místě. Při větším zatížení, a tedy i ohřátí se vibrace postupně zvětšují. Ve frekvenčním spektru se tento druh excentricity projevuje na druhé harmonické frekvenci sítě  $f_L$  a sice 100 Hz. Okolo této frekvence se obvykle nachází postranní pásma s frekvencí průchodu pólů  $f_p$ , pro kterou je vzorec uveden níže. Je důležité, aby diagnostik rozlišil druhou harmonickou síťové frekvence a druhou harmonickou frekvenci skutečných otáček rotoru. Postranní pásmo s frekvencí  $f_p$  rovněž obklopuje otáčkovou frekvenci. Velikost frekvence průchodu proudů obvykle nabývá hodnot nízkých frekvencí v rozsahu od 0,3 Hz do 2,0 Hz. Níže se nachází rovněž ilustrace takového spektra na obr. 4.28. [3][9]

Příkladem pro znázornění frekvence  $f_p$ , může být čtyřpólový motor. Frekvence průchodu pólů tedy odpovídá 3,33 Hz.

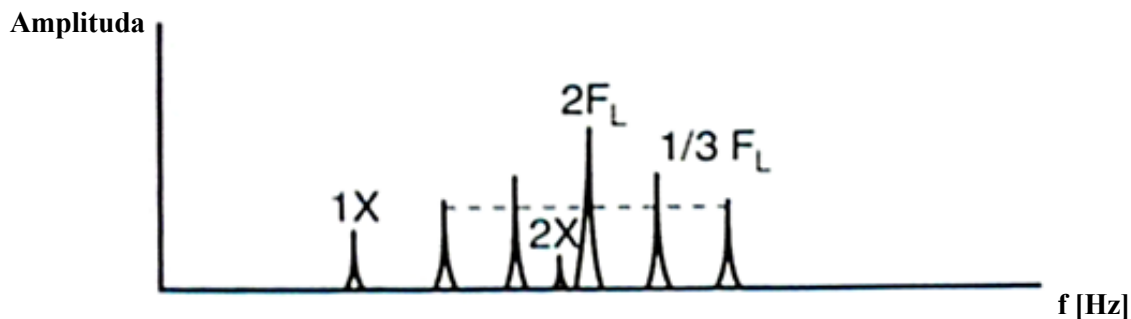
$$f_s = \frac{n_s - n}{60} = \frac{1500 - 1450}{60} = 0,83 \text{ Hz} \quad (25)$$

$$f_p = f_s \cdot 2p = 0,83 \cdot 4 = 3,33 \text{ Hz} \quad (26)$$



#### 4.2.6 Nedokonalé připojení motoru

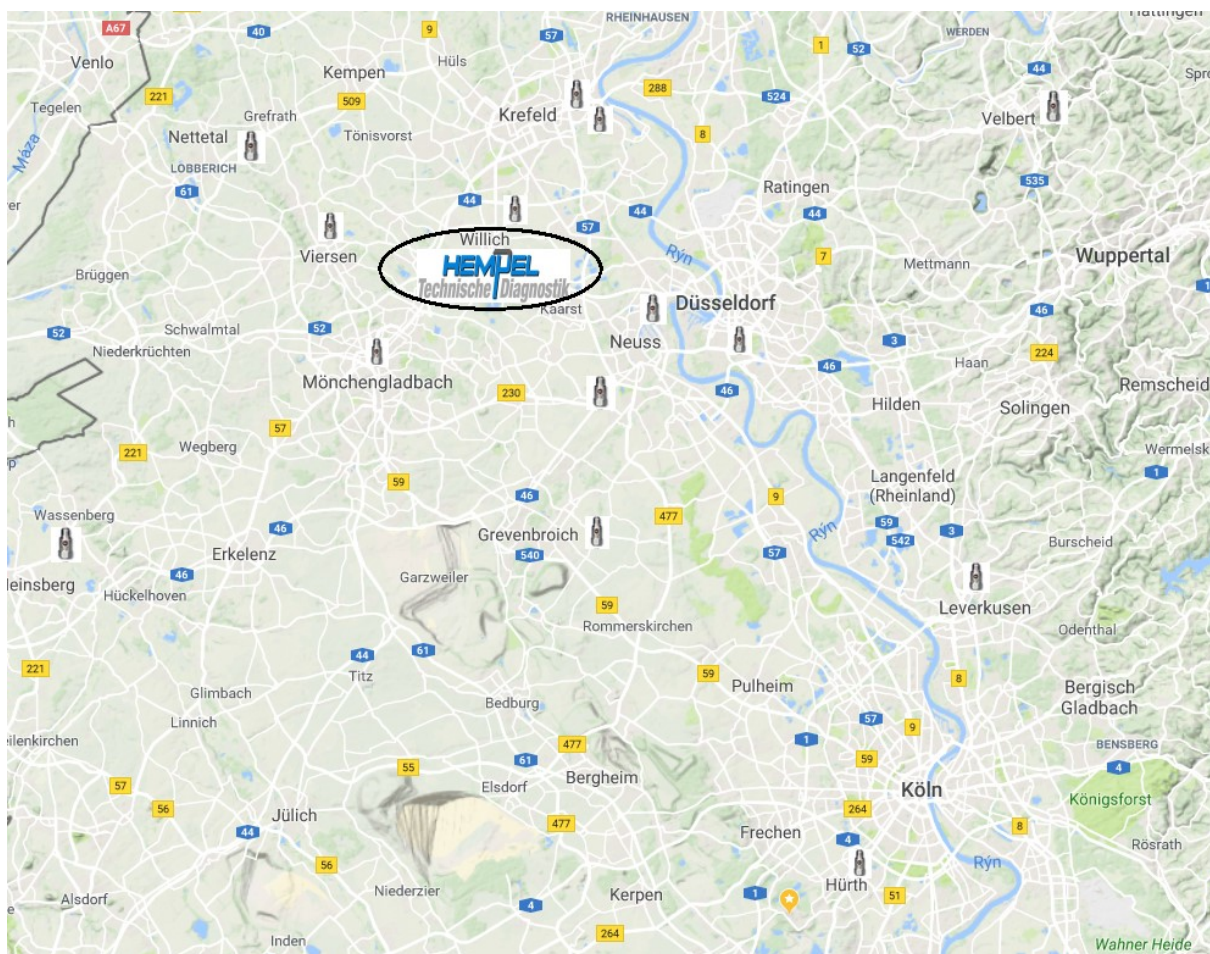
U asynchronních motorů může také dojít k problému s fázováním. Přesněji řečeno dochází ke zvýšeným vibracím, když se uvolní kontakt připojení jedné nebo více fází. Vibrace této závady se projevují ve frekvenčním spektru rychlosti na dvojnásobku síťové frekvence. Zároveň doprovází tuto frekvenci postranní frekvenční pásmo o velikosti jedné třetiny síťové frekvence. Amplituda rychlosti vibrací při této závadě zde může dosahovat vysokých hodnot okolo  $25 \text{ mms}^{-1}$ . Ilustrace takového spektra se nachází na obr. 4.29. [3][9]





## 5 Měření vibrací v průmyslových podnicích

Samotné měření v průmyslových podnicích je realizováno dvěma způsoby. Je třeba uvést rozdíl těchto způsobů měření, aby nedocházelo k desinterpretaci pojmů online diagnostika a online systému. Online diagnostika znamená měření při plném chodu motoru, tudíž není zapotřebí motor odstavovat a demontovat, což přináší velké výhody, jelikož se závady projeví při jejich přirozeném chodu. Pojem online systém pak definuje četnost sběru dat a způsob odesílání dat k jejich vyhodnocení pomocí internetového připojení. Druhý typ měření je realizován ve formě pochůzky přímo v daném závodu. Společnosti, ve kterých měření probíhají jsou pak označeny na mapě obr. 5.1.



*Obr. 5.1 Mapa měření společnosti HE*

### 5.1 Měření formou pochůzky

Tento druh měření má celou řadu výhod. Zejména z pohledu individuálního přístupu diagnostika ke každému měřenému stroji. Pochůzka měření má samozřejmě svůj postup. Diagnostik, který se vydá na pochůzku, musí mít připravený seznam strojů v měřicím přístroji a vědět kde a jaké stroje bude měřit. Vytvoření pochůzky v měřicím přístroji obvykle obstarává software, ve kterém je seznam strojů zpracován ve formě stromového rozřazení a poté zkopírován do měřicího přístroje.

K měření pochůzek a speciálním měření je ve společnosti HE využíván měřicí přístroj Bentley Nevada vb8 Portable Vibration Data Collector. Níže je uvedena tabulka technických dat tohoto měřicího přístroje. Dále mi byly zapůjčeny měřicí přístroje k testování od společnosti Adash. Konkrétně se jedná o přístroje A4400 -VA4, A4300 - VA3 a A4900 - Vibrio m. V této práci tedy budou uvedeny měření přístrojů značky Bentley Nevada se softwarem - Commtest a Adash se softwarem DDS. [15]

**Tab. 5.1** *Technické parametry měřících přístrojů*

Parametry	vb8 Commtest	Adash VA4
počet kanálů	2	4
FFT rozlišení (počet čar)	12800	3 276 800
frekvenční rozsah (kHz)	80	90
dynamický rozsah (dB)	>95	120
výdrž baterie (hod)	10	8
hmotnost	1200	2200

K oběma přístrojům lze připojit akcelerometrický snímač, pomocí kterého snímá zrychlení vibrací. Dále také laserový tachosnímač, pomocí kterého lze měřit otáčky stoje. Přístroje zaznamenávají časový signál, který pomocí FFT analýzy převádějí na frekvenční spektra. Rozsah spekter je nastavitelný dle potřeby pro konkrétní měření. Ze zrychlení vibrací dokáží také pomocí integrace dosáhnout spektra rychlosti anebo výchylky. Analyzátoři nabízí celou řadu funkcí jako je například bump test, laserové vyvažování anebo měření obálkových spekter pro indikaci ložiskových frekvencí. V tabulce je podle technických parametrů zřetelná převaha analyzátoru Adash VA4. Tento produkt je na trhu nový. Ve srovnání s vb8 je ale velmi těžký a má také menší kapacitu baterie. Svými funkcemi je lépe využitelný při speciálních měřeních, kde je potřeba preciznější diagnostika. Na pochůzky je potom určen přístroj s označením VA3, který je lehčí a jeho funkce se odvíjí podle počtu modulů. Oba přístroje mohou komunikovat s počítačem přes USB. V počítači je nainstalován přidružený software, ve kterém se nastavují stromy pochůzek, konkrétní potřebná měření a jejich parametry. Mezi ně patří potřebná měřená veličina, spektrum, časový signál anebo statická hodnota měření a také směr měření, ve kterém se měří. Druhé a velmi podstatné využití tohoto softwaru spočívá v analýze dat a sice nastavení a sledování alarmů, analýze frekvenčních spekter a průběhů trendů statických dat.

V každém závodě mají pohony svoji důležitost funkce. Podle důležitosti jsou pak rozděleny do kategorií měření v rámci pochůzek. Podle důležitosti se také rozlišuje četnost pochůzek v roce. Důležitost měření je rozdělena do skupin A, B, C, D, E. Skupina A obsahuje stroje, které jsou nepostradatelné pro výrobu a jsou neustále v provozu mimo plánovaných odstávek. Stroje skupiny A jsou měřeny formou pochůzky v průměru každý měsíc. Záleží ovšem na konkrétních podmínkách a náročnosti podniku. Alternativou pro motory skupiny A je měření pomocí online systému, o kterém bude pojednáno v další podkapitole. Do skupiny B patří stroje, jejichž důležitost v provozu je také velmi



podstatná, ale provoz ne tak častý. Jejich provoz probíhá jen v určité části procesu výroby. U skupiny B je četnost měření pochůzek každé 3 měsíce. Do kategorie C pak spadají stroje, na nichž nezávisí produkce ve výrobním slova smyslu. Tyto stroje jsou měřeny průměrně každých 6 měsíců. Další kategorií D a E jsou opět stroje, jejichž důležitost není v produkci podstatná. Měření těchto skupin má intervaly šesti měsíců anebo déle.

Jelikož společnost HE zajišťuje diagnostiku jako externí servis, je podstatné při každé pochůzce komunikovat s místními techniky, kteří zajišťují bezporuchový provoz zařízení. Je třeba získat informace o aktuálním stavu zařízení, případně o potenciálních poruchách.

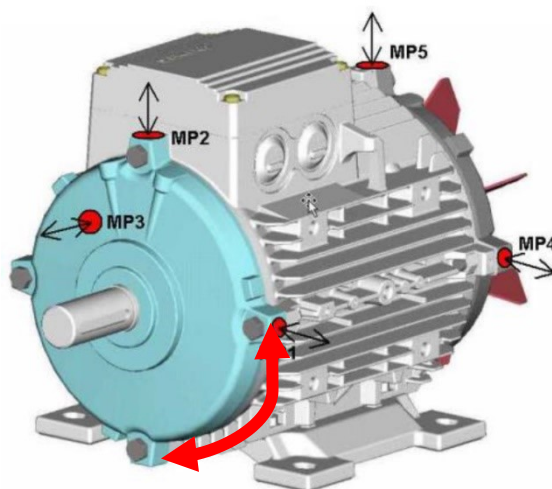
Pokud má technik veškeré potřebné vybavení a nastavení pochůzky, je zapotřebí znát také závod, ve kterém měří, bezpečnostní pravidla a také lokalizaci motorů a soustrojí, které bude měřit. Motory bývají označeny nejčastěji číslem, které musí odpovídat číslu v nastavení pochůzky v měřicím přístroji. Součástí názvu v přístroji by měl být také název zařízení pro lepší orientaci. S takovou informací si technik lépe uvědomí, v jakém směru a na jakém místě je zapotřebí upevnit snímač. Na upevnění snímače je závislá kvalita měření a správnost dat, které interpretují možnou závadu. Při pochůzce se používá uchycení snímače pomocí magnetu, proto je nutné, aby byl přichycen pevně. Ke kontrole uchycení snímače stačí na jeho konci vyzkoušet, jestli se kýve anebo ne. Pokud je snímač správně uchycen, může začít měření. Během měření je také zapotřebí sledovat stav zařízení pomocí smyslového posouzení. Například dotykem lze jednoduše zjistit, že stroj není v pořádku a soustředit se na další měření. Taktéž využití sluchového smyslu, například když jsou ložiska nedostatečně namazána, což se projevuje vysokofrekvenčním zvukem v důsledku dření ložiska. Zrakem lze samozřejmě také leccos zaznamenat a sice neváhu nebo uvolněné součásti.[4]

### 5.1.1 Směry měření

- **Směry měření na motoru**

Kromě způsobu uchycení hraje velkou roli směr umístění snímače. Všeobecně se měří ve čtyřech základních směrech. Těmi jsou axiální, horizontální, vertikální a radiální směr. Poruchy, které jsou popsány v teoretické části DP, se v některých směrech projevují více. Nejčastěji je používán radiální směr, ve kterém se projevují zejména poruchy ložisek. U velmi důležitých zařízení je dbáno na všechny směry. Přesto v naměřených spektrech v radiálním směru se projevují i ostatní poruchy. Vzhledem k tomu, že se vibrace měří na obou stranách stroje, lze tato měření porovnat a potvrdit anebo vyloučit poruchy.

Ukázka směrů měření je na obr. 5.2. Radiální směr se pak nachází mezi vertikálním spodním a horizontálním směrem. Na obrázku je zaznačena oblast radiálního směru červenou šipkou. V této oblasti lze samozřejmě měřit ze všech stran.

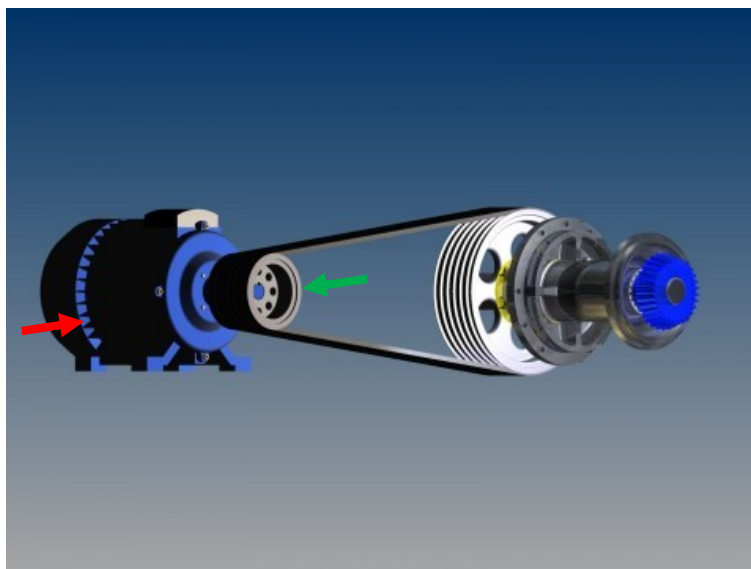


*Obr. 5.2 Směry měření na motoru*

- **Směry měření s připojenými převody**

Pokud není motor přímo připojen k zařízení, je jeho rychlost pro dané zařízení měněna pomocí převodu ve formě převodovky anebo řemenového převodu. Ty mají svá specifika a vytvářejí rovněž vibrace v určitých směrech. V této práci bude uvedeno pár příkladů, jak a kde by měl technik měřit, což rozhodně nevytváří pravidlo, nýbrž poukazuje na metodiku uvažování při měření.

U řemenového převodu, který je na obr. 5.3, lze vidět motor, na který je připojeno poháněné zařízení. V tomto případě přichází by měly být vibrace měřeny v následujících směrech. U motoru na straně pohonu je nejlepší směr měření v horizontálním směru z jeho druhé strany což ukazuje zelená šipka. Důvodem pro tento směr je největší zatížení valivých elementů ložiska právě na této straně. Druhé umístění a směr snímače pro měření pak ukazuje červená šipka na zadní straně motoru. Řemenový převod může v motoru vyvolat excentricitu, což se projeví vyosením rotoru právě do této strany.



*Obr. 5.3 Směry měření u řemenového převodu*

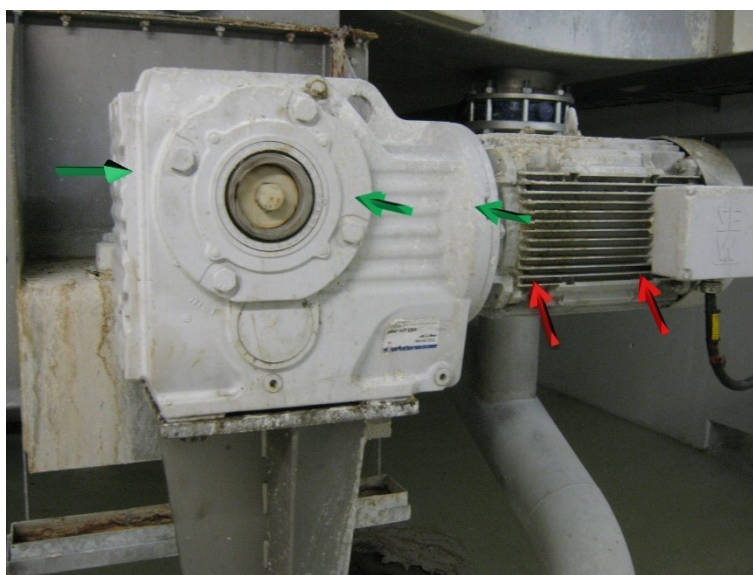
V případě, že nejsou středy řemenic ve vodorovné ose, je třeba zohlednit i působení gravitační síly. Potom je měření na motoru uskutečněno v radiálním směru, přesně jak je naznačeno na obr 5.2.

U měření motorů připojených k čerpadlům, na obr. 5.4 je umístění senzorů následující. Motor je měřen v radiálních směrech na straně pohonu a na zadní straně. Poté následují spojení čerpadla s motorem spojkou. Následují další dva měřící body na čerpadle a sice ložiska v radiálních směrech. Směry jsou zaznačeny červenými a zelenými šipkami.



**Obr. 5.4** Směry měření motoru a čerpadla

U samotných převodovek je situace komplikovanější, avšak logická. Technik musí měřit na místech, kde se nacházejí ložiska a kde jsou tato ložiska zatížena. Na obr. 5.5 jsou tyto měřící body zaznačeny šipkami. Zajímavé měřící body také mohou být v axiálních směrech ze strany motoru a v axiálním směru hřídele, která pohání dané zařízení. Pro axiální směry je užitečné měřit frekvenční spektra rychlosti v rámci vad jako jsou nevyvážka nebo špatné usazení. Pro ložiska a ozubený převod je dobré měřit frekvenční spektra zrychlení a demodulační spektra zrychlení.



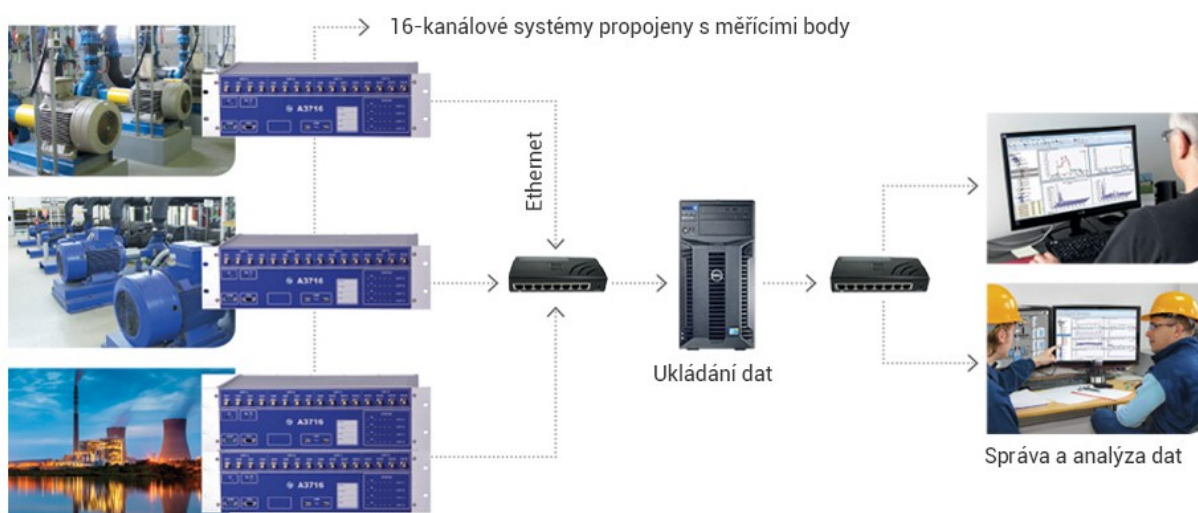
**Obr. 5.5** Směry měření na převodovce

## 5.2 Měření online systémem

Online systém je v podstatě měřicí přístroj na místě, kde jsou umístěny pohony, které jsou tímto systémem měřeny. Jedná se převážně o elektrické motory skupiny A, které jsou nezbytné pro plynulý provoz. Důležitost těchto motorů je na vysoké úrovni a při náhlé poruše, může dojít například k odstavení linky a zastavení výroby. Každá hodina odstávky pak stojí výrobní podnik desetitisíce euro. Finanční faktor ovšem není zdaleka jedinou záležitostí využívání měření online systémem. Dalším faktorem je také bezpečnostní kontrola těchto zařízení. V jistém slova smyslu se tedy jedná o prediktivní údržbu, pomocí které se dá zamezit velkým nehodám. Co se týče bezpečnosti, velkou roli zde hraje také bezpečnost samotných techniků v rámci pochůzek. Některé stroje jsou mnohdy ve velmi nepřístupných podmínkách. Proto je zde lepší umístit natrvalo snímače, kterým lze podle potřeby monitorovat stav takto nedostupného zařízení. Online systém je v podstatě měřicí karta, která je umístěna v kufru. K měřicí kartě jsou připojeny kabely vedoucí k měřicím místům, tedy k motorům. Na konci kabelů jsou připojeny akcelerometry, které jsou umístěny na měřicích bodech strojů. Tyto body mají svá konkrétní místa a mají formu měřicích úchytek nebo podložek pro akcelerometrický snímač.

V prostorech s možností nebezpečí výbuchu je důležité dbát na provedení kabelům, snímačů a také kufru s měřicí deskou. Jelikož je takové provedení finančně náročné, vyplatí se umístit kufr mimo toto prostředí a prodloužit délku kabelů, který může dosahovat až 250 metrů. Díky online systému tak lze dlouhodobě monitorovat stav motorů prakticky v jakýchkoliv intervalech.

Na obrázku obr. 5.6 je schematicky vidět řetězec posílání informací z průmyslového podniku až do společnosti HE, kde jsou data sledována na monitorech (obr.5.7) nejdříve v podobě alarmů, které podle předem nastavených hodnot hlásí čtyři rozdílné stavy.



**Obr. 5.6** Strom zapojení online systému [15]

Každý z těchto stavů je zastoupen barvou, konkrétně zelenou, žlutou, oranžovou a červenou. Pokud dojde ke změně barvy, jsou naměřená data, především ve formě frekvenčních spekter, posouzena



a analyzována. Vzhledem k tomu, že motory sledovány online systémem zastávají velmi důležitou výrobní funkci, mají také mnohdy velmi vysoké výkony. Rovněž připojená zařízení k těmto motorům jsou vysoce zatížena a vytvářejí vibrace o vysokých hodnotách. Alarmy jsou z důvodu bezpečnosti nastaveny přísněji, a proto často dochází ke změně barev alarmů. Zvýšení vibrací je ovšem přirozené a jsou způsobeny samotným procesem výroby. Proto je třeba dbát na to, aby byly spuštěné alarmy rozlišeny a sice pokud se jedná o opravdovou poruchu anebo o přirozené zvýšení vibrací způsobené výrobním procesem.



**Obr. 5.7** Sledování alarmů online systému

Četnost měření je opravdu v každém podniku a na každém zařízení rozdílná. U pohonů záleží především na druhu jejich zatížení a době kdy jsou spuštěny. Hezkým příkladem jsou vypalovací pece ve společnosti Saint Gobain Willich. Na střeše pecí jsou umístěny ventilátory, které byly dříve měřeny formou pochůzky. Jejich měření je považováno za práci ve výškách. Technik tedy měří ve velmi náročných podmínkách. Na pecích je velké teplo a technik musí být po celou dobu práce jistěn. Měření formou pochůzky probíhalo každý měsíc. Pece a ventilátory jsou zobrazeny na obr. 5.8 a obr 8.9.

Nově bylo měření pochůzkou nahrazeno online systémem společnosti ACOEM. Měření je realizováno každých deset minut, což zajišťuje dostatečnou kontrolu nad těmito motory. Existují ale také online měření, které probíhají ob den anebo několikrát během dne. Je to způsobeno tím, že činnost těchto zařízení je v provozu jen určité části dne. Proto je nastavení četnosti měření individuální. V případě, že nastane nějaká porucha, je technik schopen spustit měření v reálném čase a dostat aktuální hodnoty pro analýzu a rozhodnutí, v jakém stavu se zařízení nachází.



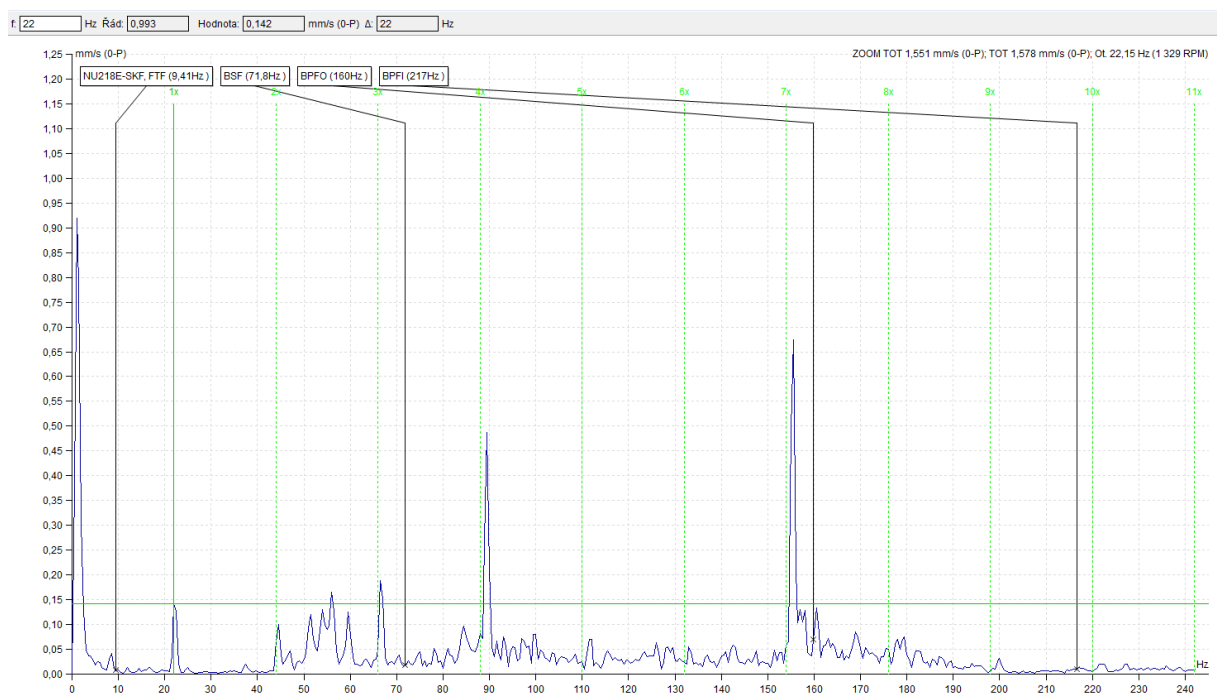
*Obr. 5.8 Měření motoru na střeše pece*



*Obr. 5.9 Měřené motory na pecích*

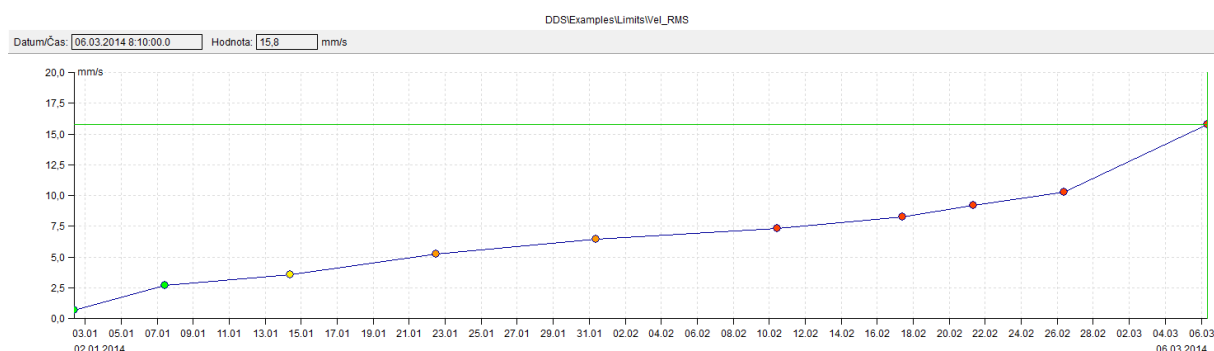
### 5.3 Analýza a vyhodnocení naměřených dat

Naměřená data ať už formou pochůzky s měřícím přístrojem anebo prostřednictvím online systému jsou analyzována pomocí softwaru, ve kterém jsou uložena veškerá měření a údaje o měřených zařízeních. Klíčová je pak především frekvenční analýza, pomocí které diagnostik hledá frekvence možných závad, anebo frekvenční souvislosti. Pokud diagnostik nezná otáčky měřeného stroje, může je najít ve frekvenčním spektru rychlosti. Hodnota otáček je pro frekvenční analýzu důležitá, jelikož většina závad se vyskytuje buď přímo na ní anebo na jejích násobcích. Pro jednoduché odhalení harmonických násobků anebo postranních pásem slouží v softwaru kurzory, které odečítají frekvenci a jí příslušnou amplitudu. U postranních pásem je důležité znát frekvenční odstupy.



**Obr. 5.10** Analýza spektra pomocí kurzoru

Na základě historie dat, upozorňujících alarmů, trendů a aktuálních frekvenčních spekter je potom na diagnostikovi, aby rozhodl, jestli je zařízení v dobrém stavu anebo doporučil opravu. Podle tabulkových hodnot se někdy může zdát, že motor není v pořádku. Jak už zde bylo zmíněno, zvýšené vibrace mohou vznikat v důsledku samotného procesu anebo vznikající závady nejsou ještě tak závažného charakteru. V těchto případech je velmi cenným nástrojem trendová křivka, která ukazuje spodní a horní mez přijatelných hodnot.



**Obr. 5.11** Trendová křivka vibrací

Samotná vizualizace a interpretace výsledků je také důležitá. Informace o aktuálním stavu motoru anebo jiného zařízení jsou obvykle obsahem dokumentu microsoft office. Dnešní nároky se avšak zvyšují a společnost HE musí reagovat na aktuální poptávku. O rozšíření a zkvalitnění interpretace naměřených dat se bude více zabývat závěrečná kapitola, která pojedná i o možnostech vibrodiagnostiky v budoucnosti.

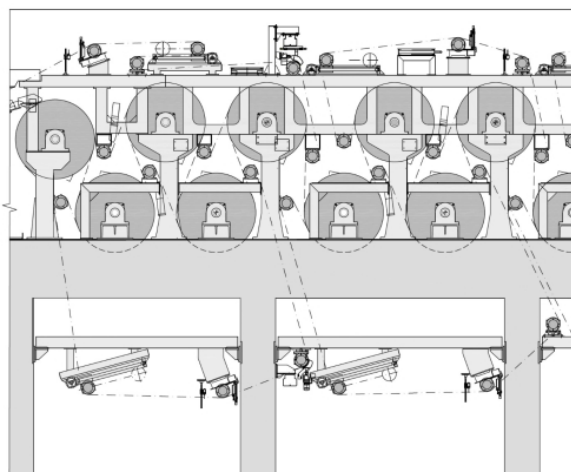
## 6 Měření vibrací mechanických příčin

### 6.1 Vývoj poruchy valivého ložiska

Postup při diagnostice valivého ložiska je již popsán v teoretické části. Zde je uvedeno konkrétní měření, které probíhalo formou pochůzky v papírně UPM Hürth Rhein Papier GmbH. Jedná se o motor, který pohání parní válec papírenského stroje v sušící sekci. Štítkové údaje jsou uvedeny v tabulce tab. 6.1. Schéma sušící sekce a obrázek motoru je uveden níže.



Obr. 6.1 Měřený motor



Obr. 6.2 Schéma sušící sekce [14]

Tab. 6.1 Štítkové údaje motoru

<b>Typ</b>	1LA61834AA60-Z	<b>IP</b>	54	<b>izolace</b>	F
<b>v.č.</b>	E0202/234309	<b>IM</b>	3001	<b>zatížení</b>	S1
<b>U (V)</b>	Y - 690	<b>P (kW)</b>	265	<b>f (Hz)</b>	50
<b>I (A)</b>	240	<b>ot. (min<sup>-1</sup>)</b>	990		

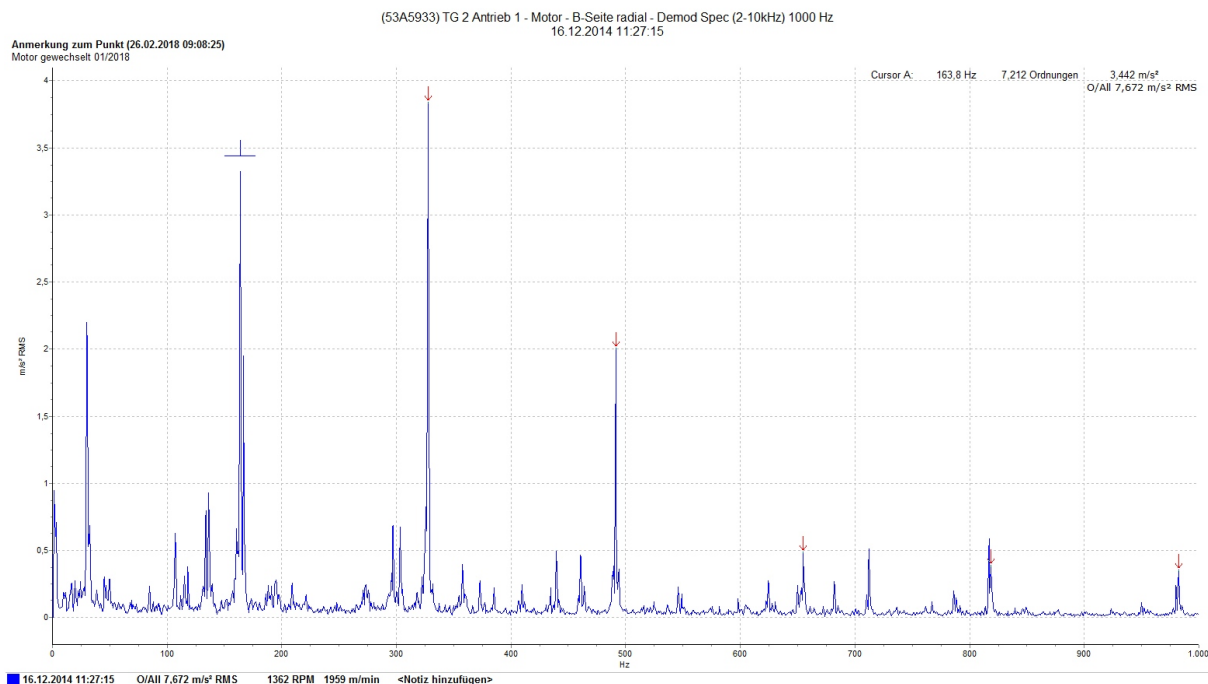
Tento motor je měřen formou pochůzky každý měsíc a je zařazen do měřicí skupiny A. U tohoto motoru se objevila frekvence závady ložiska FAG NU224E na zadní straně motoru, konkrétně vnějšího kroužku. Hodnota frekvence je dána násobkem koeficientu, který je závislý na rozměrech ložiska, které níže charakterizuje číslo BPFO a na otáčkové frekvenci. Otáčková frekvence motoru je proměnná, ale pohybuje se kolem hodnoty 22,22 Hz. Výpočet frekvence závady vnějšího kroužku je uveden níže.

$$f_{BPFO} = BPFO \cdot f_{ot} \quad (27)$$

$$f_{BPFO} = 7,195 \cdot 22,22 = 159,87 \text{ Hz}$$

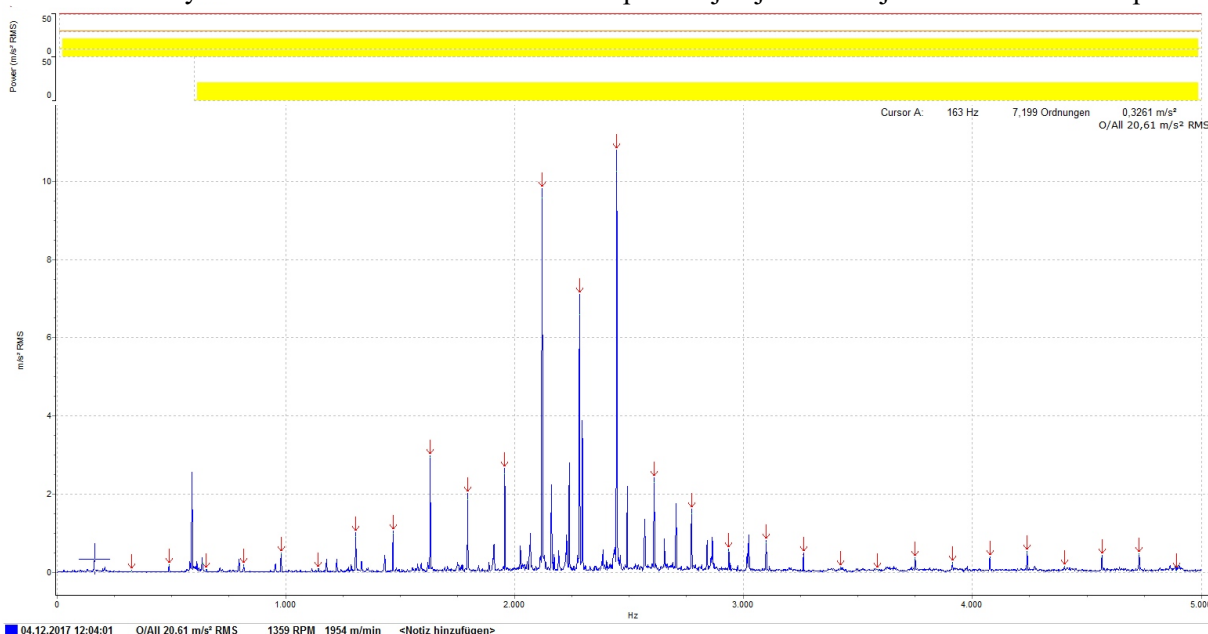
Vývoj závady ložiska se nejdříve projevuje v demodulačním spektru. To je také vidět na grafu obr. 6.3. Závada se projevuje minimálně a amplituda vibrací dosahuje rovněž malé hodnoty. Graf demodulačního spektra je z měření, které proběhlo před čtyřmi lety. Každý měsíc tedy probíhá kontrola těchto spekter a sledování zvětšujících se amplitud, případně vznikajících násobků poruchových frekvencí a postranních pásem kolem nich. V demodulačním spektru se objevuje frekvence poruchy vnějšího kroužku 163,8 Hz, což odpovídá aktuálním otáčkám stroje.





**Obr. 6.3 Demodulační spektrum**

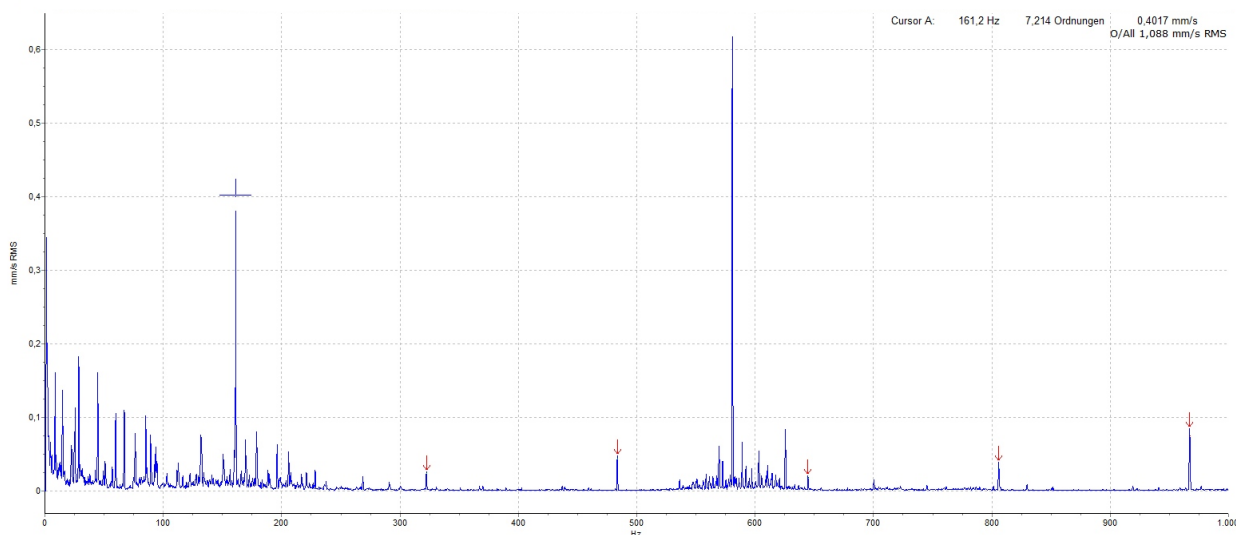
Sledování vývoje poruchy ložiska pokračuje kontrolou frekvenčního spektra zrychlení. Právě tady se dále projevuje poškození ve formě násobku základní frekvence poruchy ložiska s postranními pásmy, jejichž odstup nabývá také hodnoty frekvence poruchy. Spektrum zrychlení je na obr. 6.4. Červené kurzory značí násobek základní frekvence úplně stejně jako tomu je u demodulačního spektra.



**Obr. 6.4 Frekvenční spektrum zrychlení**

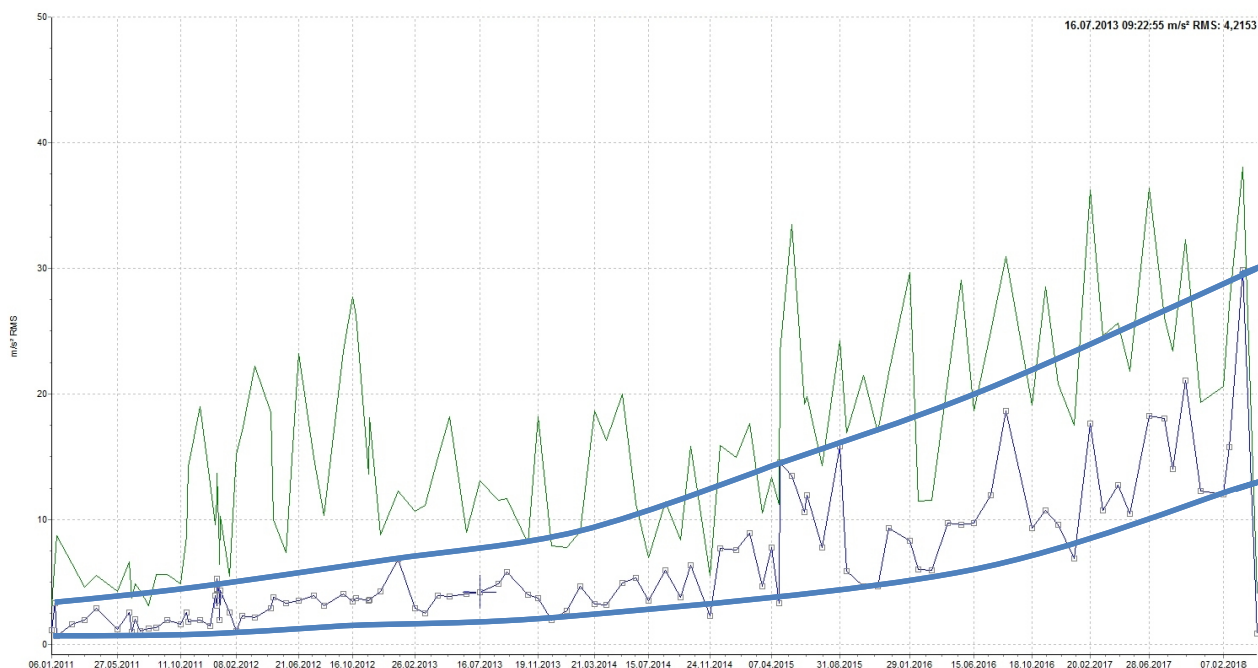
Zvětšující se amplitudy na poruchových frekvencích jsou zaznamenávány i alarmy, které jsou nastaveny na základě normy ISO 10816-3 a podle procesního zatížení. Při sledování spekter musí diagnostik rozhodnout, kdy je nutná výměna, popřípadě oprava stroje. Neexistuje žádná norma, která by dokázala rozhodnout, kdy je ložisko poškozené anebo jak dlouho může motor s poškozeným ložiskem běžet. K tomuto rozhodnutí přispívá frekvenční spektrum rychlosti vibrací. Pokud se nacházejí

poruchové frekvence ve frekvenčním spektru rychlosti, značí to již velké poškození a je zde doporučena oprava. Frekvenční spektrum rychlosti je umístěno níže na obr. 6.5. Jsou zde vyznačeny násobky poruchové frekvence 161,2 Hz.[1]



**Obr. 6.5** Násobky poruchové frekvence

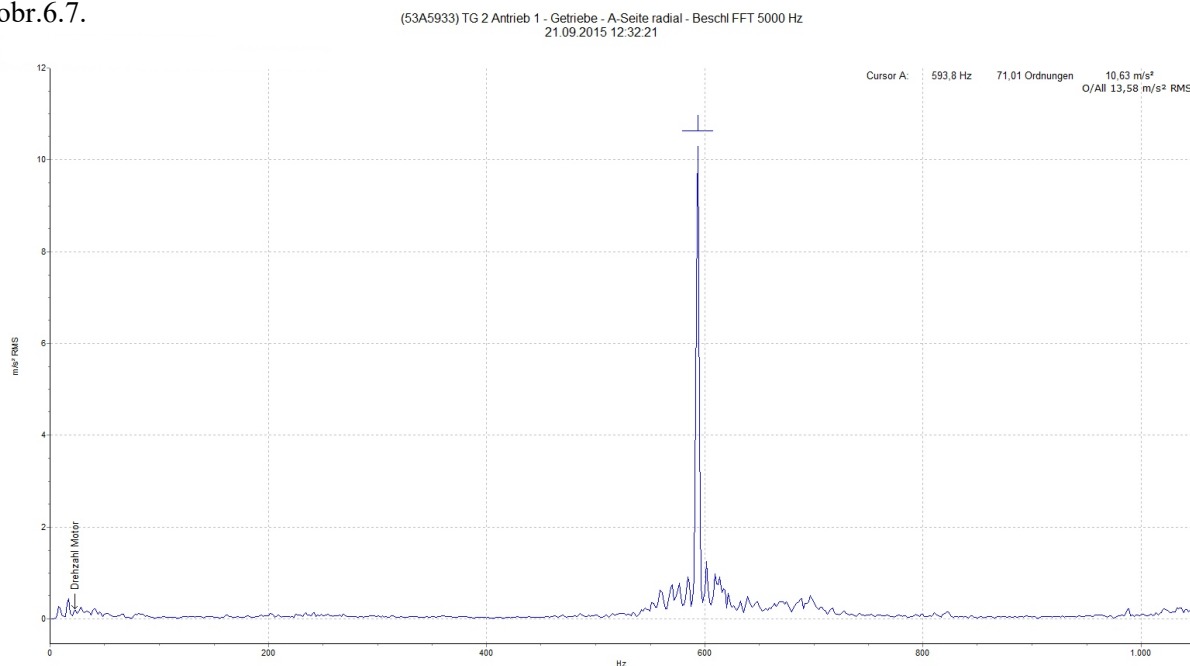
V rámci rozhodování pomáhá taky sledování trendů vibrací. Vzhledem k tomu, že je motor měřen už 8 let, vzniklo díky pochůzkového měření mnoho dat, a tedy i prakticky využitelný trend vibrací.



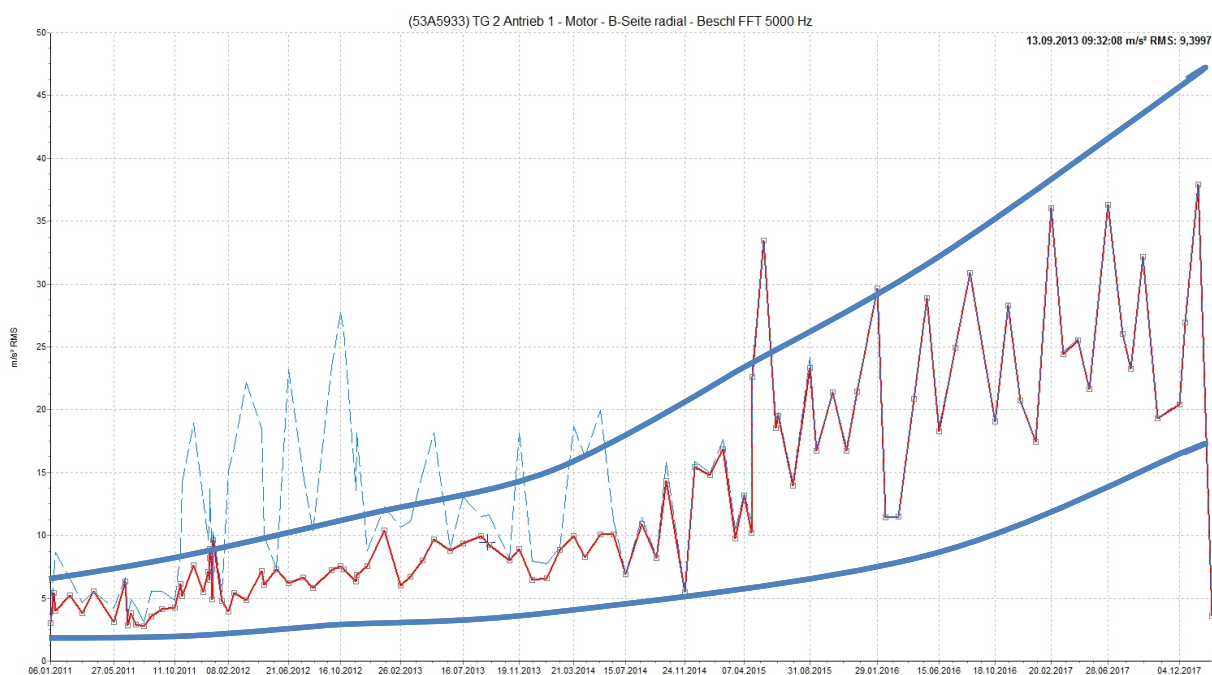
**Obr. 6.6** Trendová křivka demodulace a zrychlení

Na obr. 6.6 se nachází trendové křivky statických hodnot. Zelenou barvou jsou označena měření zrychlení a modrou barvou demodulační hodnoty. Zelený trend zrychlení ovšem neukazuje vývoj poruchy ložisek jako demodulační spektrum. Je to způsobeno výpočtem RMS hodnoty v celém rozsahu frekvenčního spektra. Ve spektru vibrací zrychlení se nachází zvýšená amplituda na zubové frekvenci převodovky. Díky této frekvenci se statická hodnota zrychlení navyšuje a zkresluje trendovou křivku

poruchy vnějšího kroužku ložiska. Tato frekvence je viditelná ve frekvenčním spektru zrychlení na obr.6.7.

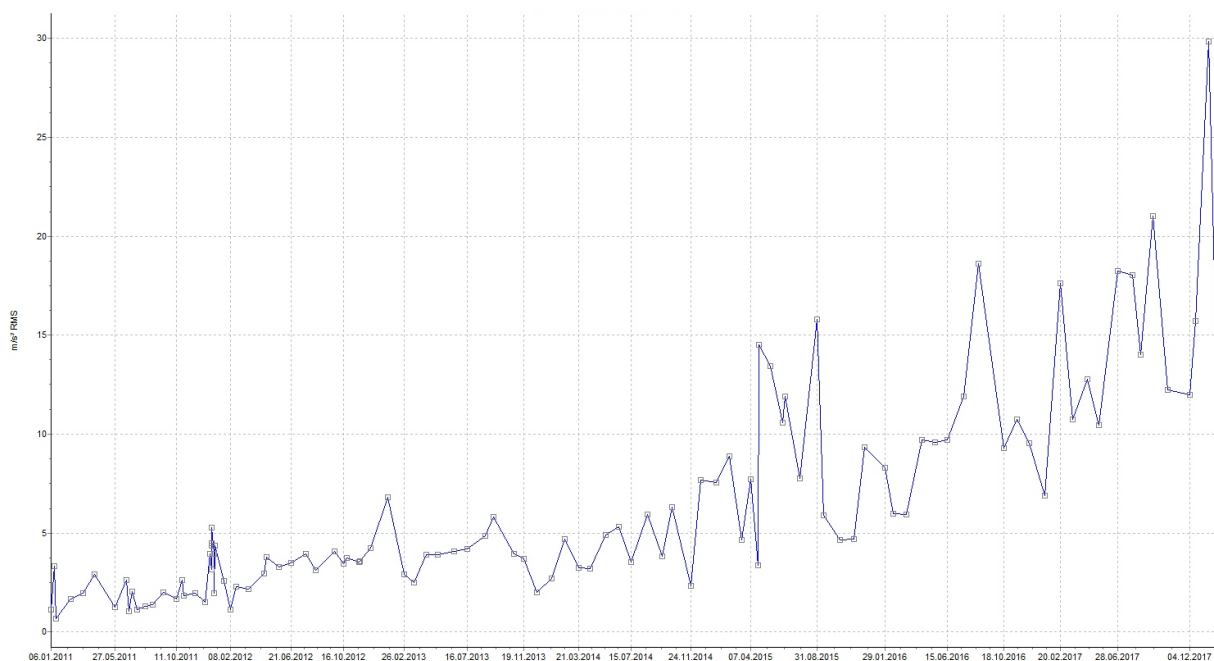


**Obr. 6.7** Zubová frekvence převodovky



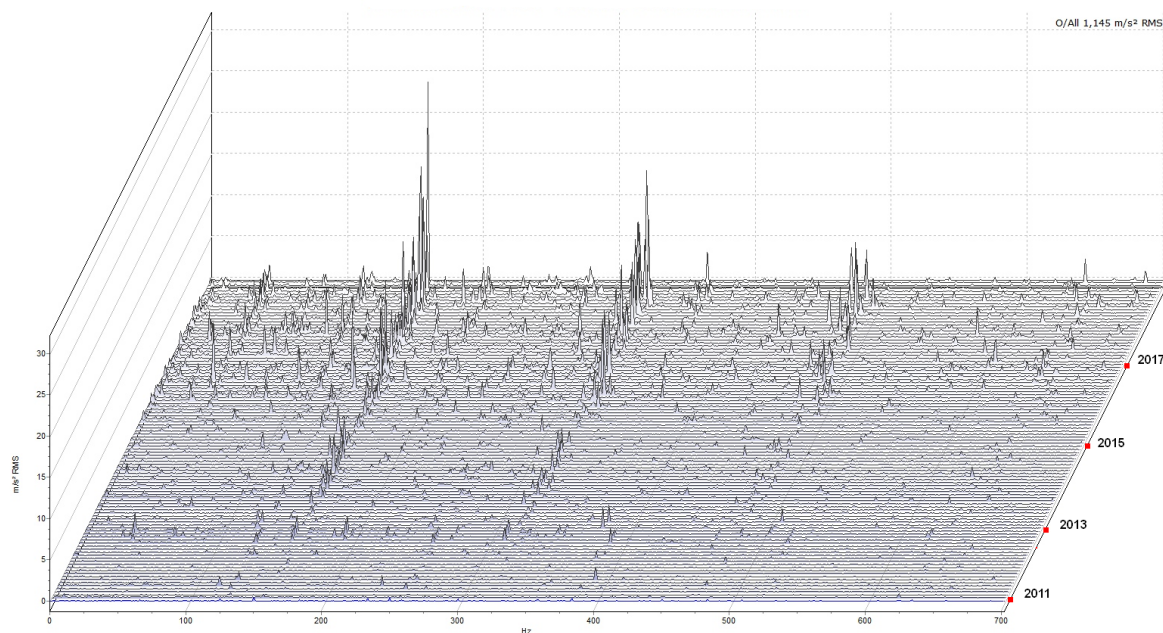
**Obr. 6.8** Trendová křivka bez zubové frekvence

Pomocí softwarové funkce byla odfiltrována ze spektru frekvence patřící převodovce. Poté trend vibrací zrychlení změnil tvar obálky trendu a je velmi podobný demodulačním hodnotám a sice charakter trendu je stoupající.



**Obr. 6.9** Trend demodulačních hodnot

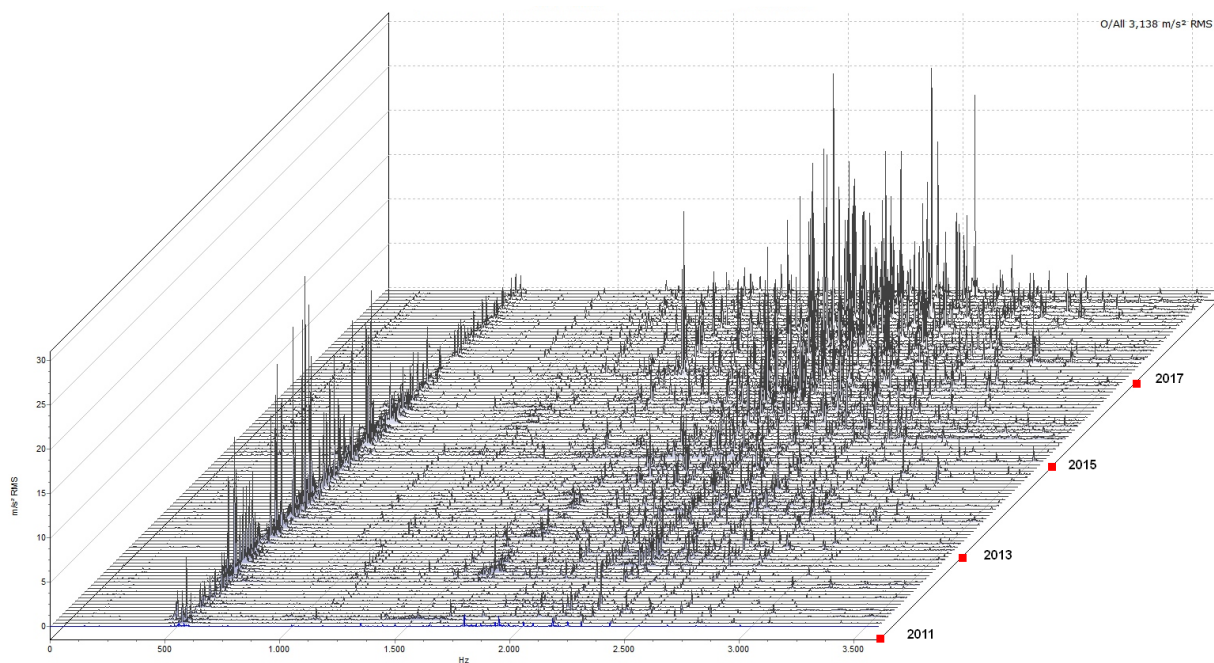
Postupné sledování vibrací lze uplatnit jak pomocí trendových křivek, tak pomocí grafu zvaný waterfall. Zde jsou za sebou demodulační spektra řazeny do kaskády a ve větším množství ukazují vývoj poruchy. Na obr. 6.10 je vidět postupné zvyšování amplitudy poruchové frekvence ložiska a také vývoj zvyšování amplitud na násobcích této frekvence.



**Obr. 6.10** Waterfall demodulačních spekter

Na obr. 6.11 je vidět vývoj zvýšení amplitud zrychlení opět v grafu typu waterfall. Okolo frekvence 593 Hz se objevují zvýšené amplitudy patřící zubové frekvenci převodovky.

V pásmu od 1500 Hz do 2000 Hz je také vidět postupné zvětšení amplitud zrychlení. Jedná se tedy o násobky poruchové frekvence s postranními pásmy.



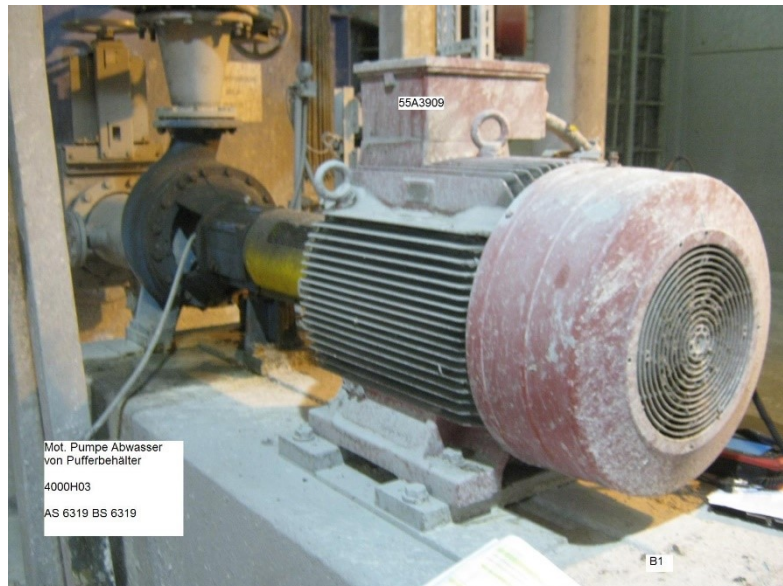
**Obr. 6.11** Waterfall spekter zrychlení

V tomto případě bylo vidět, jak se postupně poruchy ložiska rozvíjí. V rámci sledování dostal papírenský závod informace o potřebné výměně ložiska. Tento papírenský závod při plánované odstávce motor vyměnil. Vibrodiagnostika tedy splnila svůj účel a zabránila zničení motoru anebo nehodě.



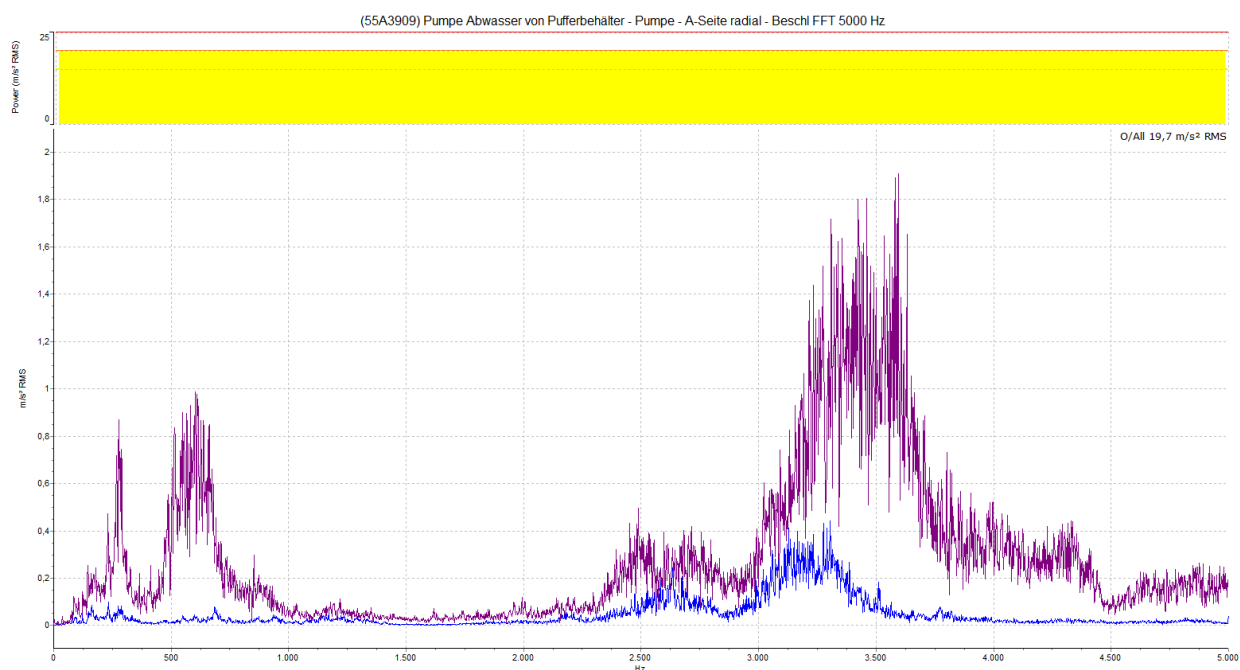
## 6.2 Kavitace

Další měření bylo provedeno také formou pochůzky v papírně UPM Hürth Rhein Papier GmbH konkrétně na čerpadlu, které je poháněné asynchronním motorem kategorie B. Toto soustrojí je vidět na obr. 6.12. V naměřených frekvenčních spektrech na motoru se nenalezly žádné mimořádné frekvence.



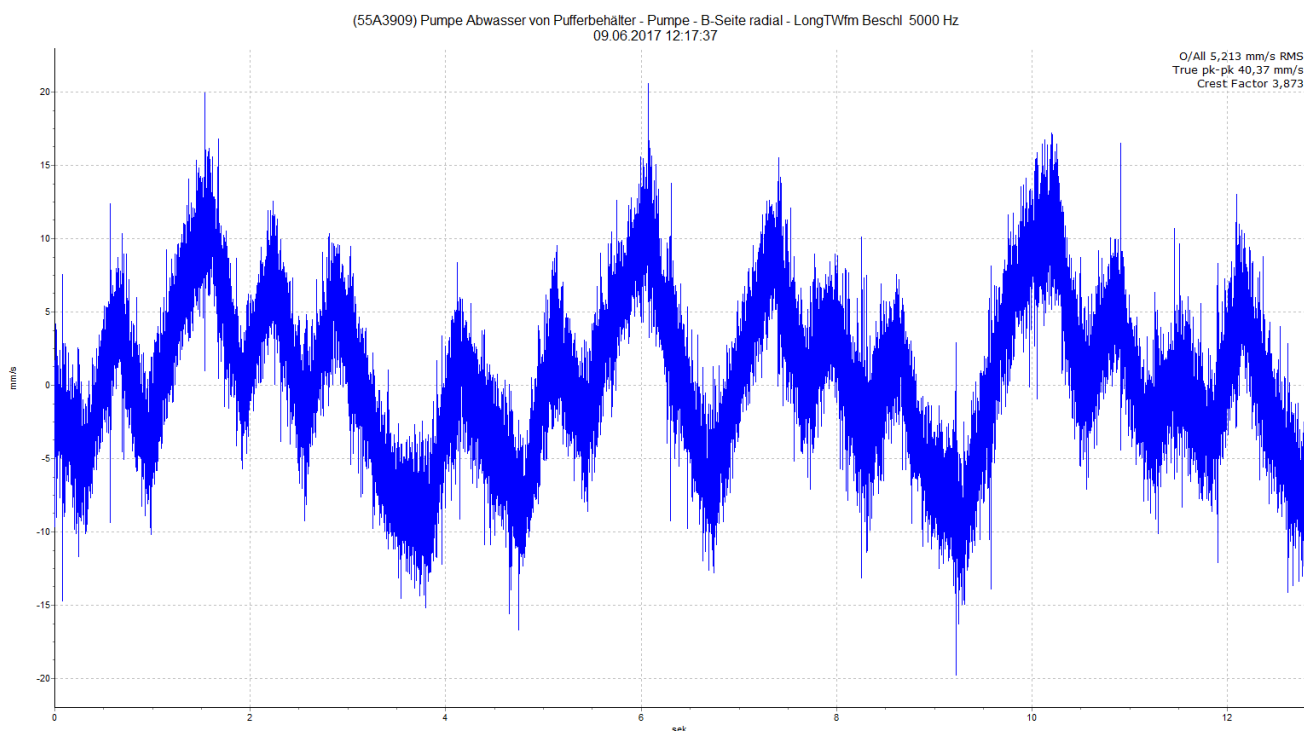
**Obr. 6.12** Soustrojí motoru a čerpadla

V naměřeném spektru zrychlení čerpadla na straně pohonu bylo podezření na závadu opotřebení ložisek, ale zvýšení amplitud na ložiskových frekvencích s postranními pásmy se neprojevilo.



**Obr. 6.13** Frekvenční spektrum zrychlení

Proto byl změřen také časový signál rychlosti vibrací čerpadla obr. 6.14. Tento signál je dlouhý přibližně 13 sekund. Čerpadlo vyvolává turbulence, díky kterým vzniká velký hluk a také vibrace, charakteristické svým spektrem a špičkami v časovém signálu rychlosti.



**Obr. 6.14** Časový signál rychlosti

Lopatky čerpadla jsou s největší pravděpodobností poškozeny z důvodu působení kavitace. Ta vzniká v důsledku poklesu tlaku tekutiny, která je čerpána. V závislosti na snížení tlaku vznikají v tekutině dutiny. Po vymizení podtlaku, se dutiny deformují a vzniká rázová vlna. V důsledku imploze dutin dochází k mechanickému poškození lopatek čerpadla. Tento jev může být také doprovázen světelným efektem, hlukem a také vibracemi.

## 7 Měření vibrací elektromagnetických příčin

### 7.1 Měření motoru napájeným frekvenčním měničem

V této části práce budou uvedena měření vibrací elektrických příčin a jejich výsledky. Jedním z nich je měření na asynchronním motoru 6PSCR2 v papírně společnosti Smurfit Kappa Zülpich Papier GmbH. Tento motor byl napájen frekvenčním měničem a poháněl čerpadlo. Měření na motoru probíhalo formou pochůzky skupiny motorů a zařízení A. Vzhledem ke skutečnosti, že motor byl v provozu pár měsíců, neočekávala se na něm žádná závada. Ve spektru zrychlení se vyskytovaly ložiskové frekvence a jejich amplitudy dosahovaly dle žlutého alarmu, nicméně jejich stav byl stále akceptovatelný a nejevil kritické hodnoty.

Motor byl během měření vibrací smyslově posouzen. Během svého provozu bylo jeho oteplení příliš vysoké. Vzhledem ke změnám zatížení a napájení z frekvenčního měniče, lze toto oteplení pochopit. Nicméně při analýze vibrací se bral větší ohled k tomuto motoru.

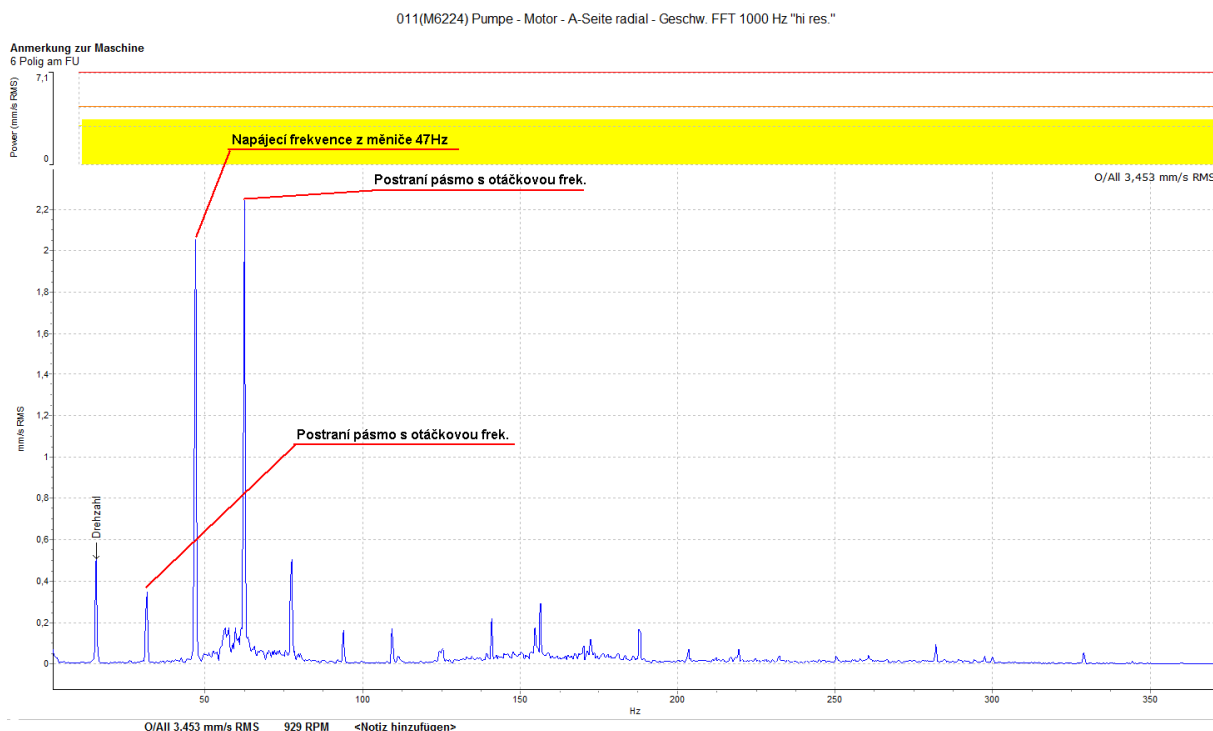
**Tab. 7.1** Štítkové hodnoty motoru

<b>Typ</b>	14F 5000 – 8	<b>IP</b>	54	<b>izolace</b>	F
<b>v.č.</b>	160563	<b>IM</b>	3001	<b>zatížení</b>	S1
<b>U (V)</b>	690	<b>P (kW)</b>	90	<b>f (Hz)</b>	50
<b>I (A)</b>	70	<b>ot. (min<sup>-1</sup>)</b>	985		

Ve frekvenčním spektru rychlosti vibrací lze spatřit zvýšenou amplitudu rychlosti na frekvenci 47 Hz. Takové spektrum je velice neobvyklé. Tato frekvence je pravděpodobně způsobena působením frekvenčního měniče. V jejím okolí se rovněž nachází postranní pásmo s odstupem otáčkové frekvence, která se nachází ve spektru také, konkrétně na 16 Hz. Tuto hodnotu také potvrzuje skutečnost, že měřený motor je šestipólový.

Naměřené spektrum je velmi nestandardní a vzhledem ke zvýšené teplotě motoru a také výskytu ložiskových frekvencí byl podroben elektrickým testům vinutí pomocí analyzátoru PdMA při jeho režimu zatížení. Na obr. 7.1 se pak nachází naměřené frekvenční spektrum s vyznačenými důležitými frekvencemi.





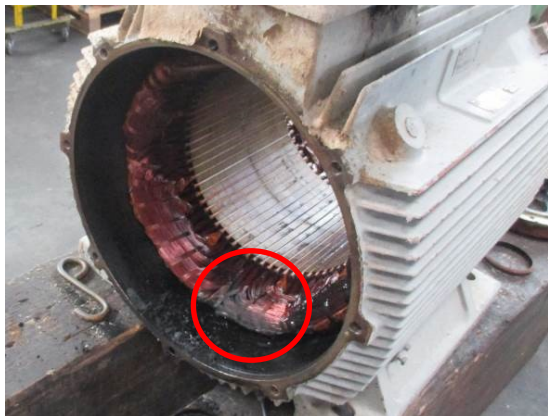
Obr. 7.1 Frekvenční spektrum s frekvencí měniče

Na základě aplikace elektrických testů měřených analyzátozem PdMA s klešťovými sondami proudu vzniklo podezření na mezizávěťový zkrat ve vinutí. Z frekvenčního spektra vibrací je někdy obtížné bez jakékoliv pomoci takto diagnostikovat poruchu. Proto je zapotřebí doplňovat měření o další testy, které hypotézu potvrdí anebo vyvrátí. Údaje z elektrického měření se nachází v tabulce tab. 7.2. Hodnoty napětí fází nejsou zcela symetrické, avšak jejich difference nejsou příliš vysoké při porovnání s hodnotami proudu. U naměřených hodnot proudu je vypočítán jejich aritmetický průměr. Největší rozdíl vztažený k aritmetickému průměru pak činí 18,26 % hodnoty elektrického proudu. Taková nesymetrie je velmi vážná a může vést až k destrukci stroje. Motor byl tedy odpojen a poslán do společnosti HE na další diagnostiku a opravu stroje.

Tab. 7.2 Elektrické měření motoru

	U – 0 (V)	I (A)	P (kW)	cos $\phi$
Fáze 1	287,89	64,16	15,54	0,84
Fáze 2	273,74	51,2	10,66	0,76
Fáze 3	276,75	47,4	11,55	0,88
Průměr	279,46	54,25	-	-
Průměr (%)	3,02	18,26	-	-

Motor byl demontován a jeho součásti přezkoumány. Už jen ze smyslového posouzení bylo jasné, že vzniklý problém je elektromagnetické příčiny. Na statorovém vinutí je vidět tepelné opotřebení izolace, tmavě zbarvené způsobené průchodem velkého proudu. Opotřeбенá místa jsou označena na obr. 7.2 červeným kroužkem.

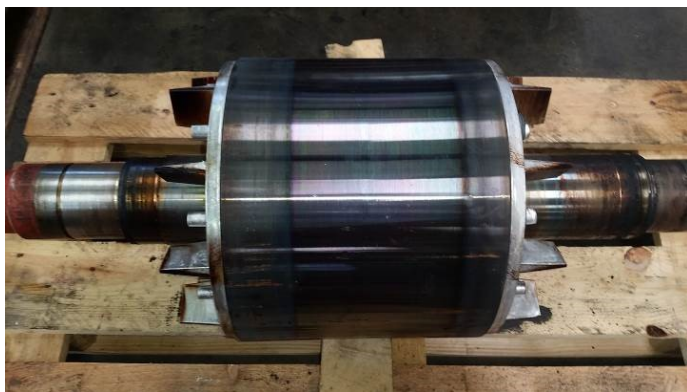


**Obr. 7.2** Poškození vinutí



**Obr. 7.3** Mezizávitový zkrat

Oteplení podlehl také rotor, který je zbarven od jeho středu ke stranám modro fialově. Takové zbarvení pak odpovídá teplotám okolo 300 °C. Na obr. 7.4 lze vidět také oteplení rotorových kruhů včetně hřídele na straně pohonu. Na hřídeli se ještě pohyboval vnitřní kroužek ložiska, čímž vzniklo poškození hřídele, ložiska a rovněž přispělo k oteplení.



**Obr. 7.4** Zbarvený poškozený rotor



**Obr. 7.5** Poškozená hřídel

Další poškození vzniklo na ložiscích motoru. Ložiska se sice nejeví jako příčinou problému, nicméně je zde ukázáno, jak spolu jednotlivé závady souvisí a pokud se včas nezakročí, mohou vzniknout další závady vedoucí k destrukci stroje, zastavení provozu a ohrožení bezpečnosti. Ložisko na straně pohonu bylo poškozeno, na což poukazovalo frekvenční spektrum zrychlení. Postupně na vnějším kroužku vznikaly stopy a drobné díry, které se postupem času zvětšují a podněcují vznik dalších. Ložisko tedy bylo nedostatečně mazáno, a proto byla jeho životnost zkrácena. Dalším velice zajímavým poznatkem je ložiskový proud, který tímto ložiskem procházel a pravděpodobně se projevil jako kapacitní proud způsobený frekvenčním měničem. Na ložisku zanechal stopy v podobě černé linie

kráterků. V ložisku a také v krytu ložiska se nacházelo spálené mazivo. To se mohlo vznítit z důvodu průchodu ložiskového proudu anebo z důvodu vysoké teploty vinutí, rotoru, hřídele, a tudíž i samotných ložisek. Vnitřní kroužek se na hřídeli točil také z důvodu oteplení hřídele. Samotná usazení ložiska se provádí jeho nahřátím z důvodu roztažnosti kovu. Bohužel v tomto případě roztažnost oteplením nebyla účelná a došlo k poškození hřídele. Závady ložiska lze vidět níže na obr. 7.7.



**Obr. 7.6** Spálené mazivo v krytu ložiska



**Obr. 7.7** Poškozené vnitřní kroužky ložiska

Z důvodu špatného mazání dochází k závadě valivých elementů, které jsou při každém styku s kráterkem nebo rýhou dále poškozovány. Na obr. 7.8 níže je přiblížen detail vnitřního kroužku ložiska. Jsou zde vidět opět hnědooranžové pásma způsobené nedostatečným mazáním.



**Obr. 7.8** Poškozené ložisko

Při demontáži byl změřen izolační odpor vinutí a také jednotlivé odpory a indukčnosti vinutí. Vinutí motoru bylo měřeno již před dvěma lety, takže se hodnoty aspoň přibližně daly porovnat. Hodnota izolačního odporu klesla o řád, avšak stále nepoukazovala na nízký izolační stav. Hodnoty odporů se také obzvláště nelišily. Bohužel nebylo možno motor podrobit rázovou zkouškou, kde by se

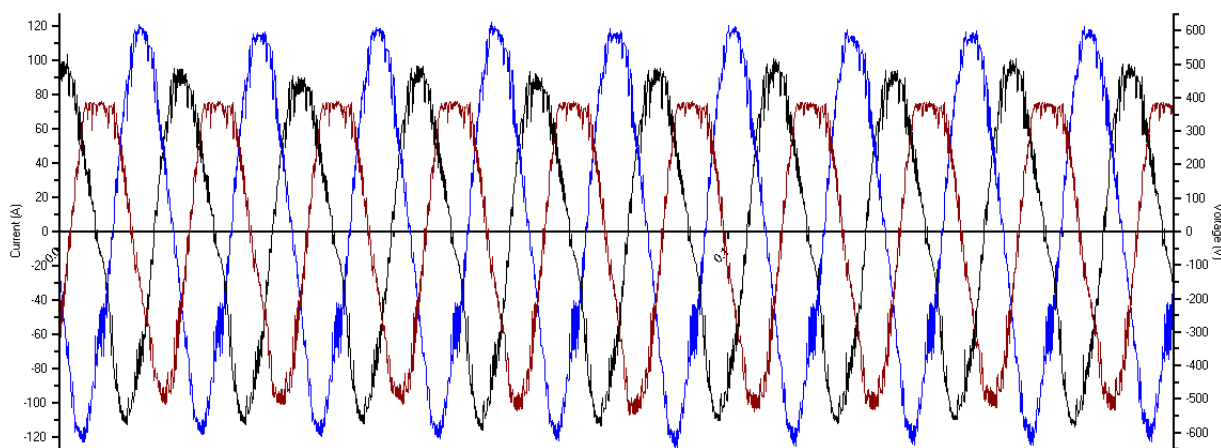
mezizávitový zkrat určitě projevil. Nicméně je třeba zvážit naměřené indukčnosti a velikosti hodnot proudů jednotlivých fází uvedené v tab. 7.3. Vzhledem k elektrickým parametrům doplňuje stanovení nové hypotézy taky frekvenční spektrum vibrací. Mezizávitový zkrat se ve vinutí samozřejmě vyskytovat může, avšak jeví se spíše jako důsledek než příčina poruchy. Jako poslední rozhodovací aspekt byl naměřen časový signál proudu, který poukázal na možnou příčinu poruchy frekvenčního měniče. Časový signál je vidět na obr. 7.9. Horní špičky průběhu proudu označeném červenou barvou jsou do jisté míry useknuté a neodpovídají předpokládanému harmonickému tvaru.

**Tab. 7.3** Naměřené hodnoty odporů a indukčnosti vinutí

	R (mΩ) dobrý stav	R (mΩ) porucha	L (mH) dobrý stav	L (mH) porucha
Fáze 1 - 2	0,1380	0,0460	8,2450	1,4900
Fáze 1 - 3	0,1375	0,0630	10,2900	0,1400
Fáze 2 - 3	0,1380	0,0660	9,2550	1,0350
Průměr	-	-	9,2630	0,8880
Průměr (%)	-	-	11,08	84,24

**Tab. 7.4** Naměřené izolační odpory

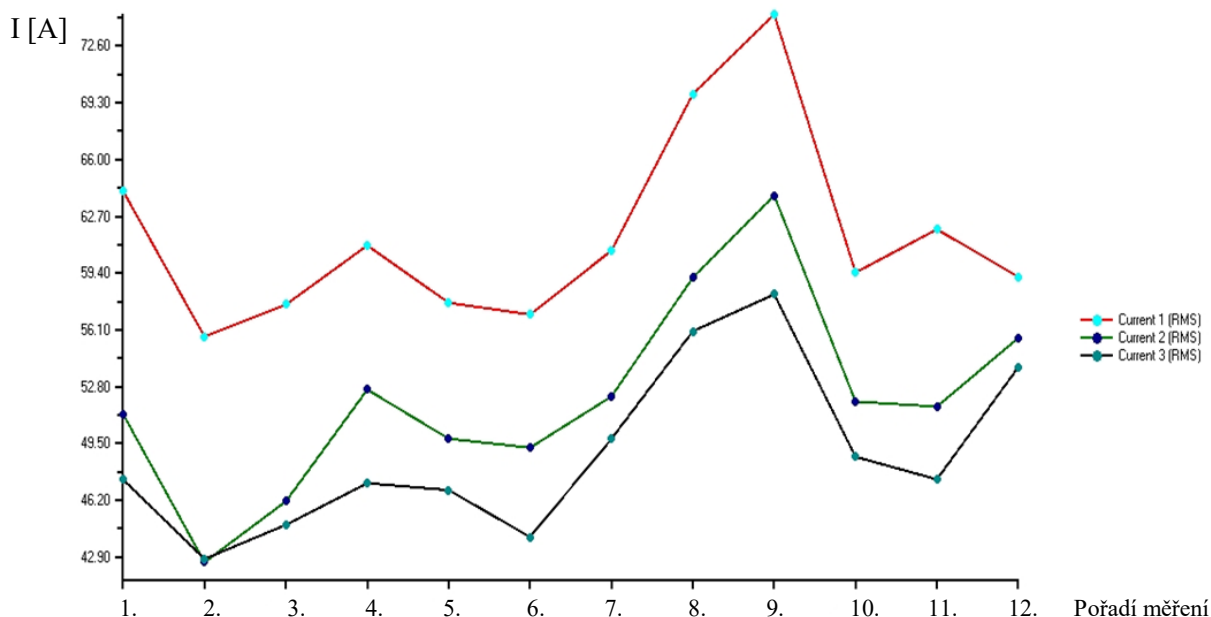
	R (MΩ) dobrý stav	R (MΩ) porucha
Izolační odpor	47910,00	7700,00



**Obr. 7.9** Naměřené průběhy proudů

Z naměřených dat a průběhů napájecího proudu, je zřejmé, že vzniklé poruchy způsobil frekvenční měnič, který motor napájel nesymetrickým proudem. Jednotlivé nesymetrie dále charakterizuje graf na obr. 7.10, kde jsou zaznamenány trendové křivky měření proudu všech fází v průběhu jednoho dne.





Obr. 7.10 Trendy efektivních hodnot proudů

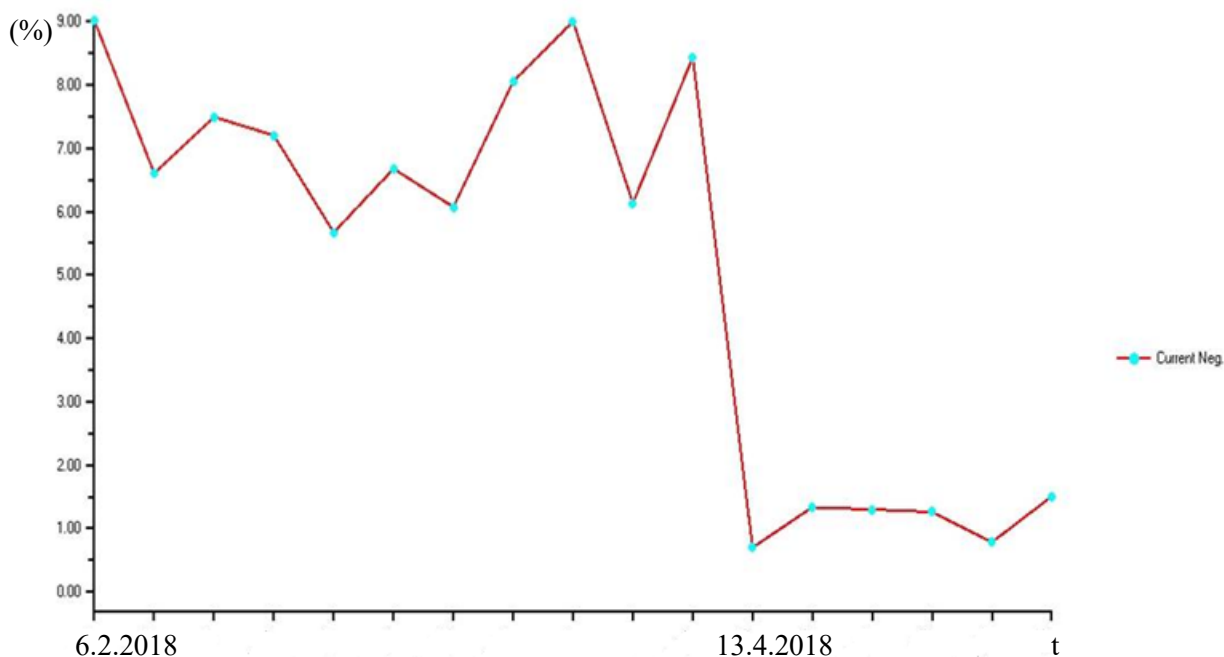
Po naměření a opravě motoru, tzn. vyčištění motoru, převinutí a výměny ložisek, byla doporučena výměna frekvenčního měniče a nové měření všech parametrů pro potvrzení hypotézy nefunkčního frekvenčního měniče.

Po přezkoušení a měření připojeného opraveného motoru k novému frekvenčnímu měniči, se nesymetrické proudy znova neobjevovaly. Srovnání naměřených dat s nesymetrickými proudy a dat s proudy po opravě a výměně frekvenčního měniče je v tabulce tab. 7.5. Žlutě označené pole značí naměřené hodnoty před opravou a zelené po opravě. Procentní rozdíl nejvyšší naměřené hodnoty proudu a průměru všech proudů jsou označeny červenou a modrou barvou. Po výměně měniče tato hodnota klesla z 18,26 % na 3,89 %, což charakterizuje symetrii motoru.

Tab. 7.5 Srovnání hodnot po výměně měniče

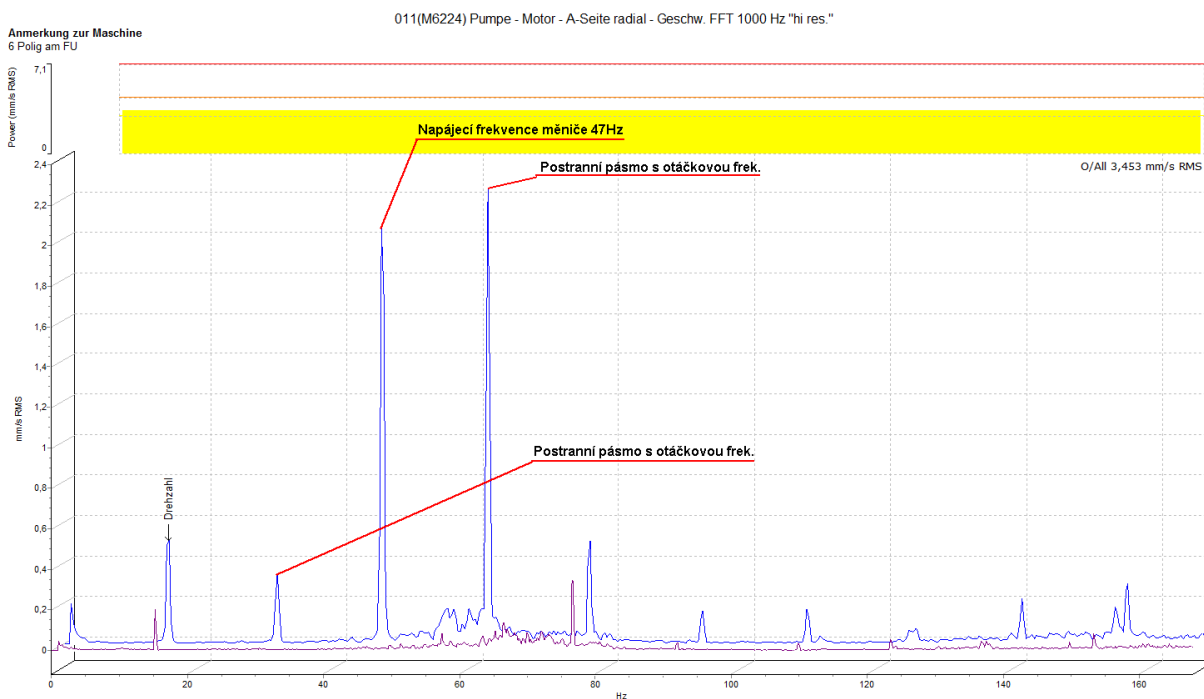
	U-0 (V)	U-0 (V)	I (A)	I (A)	cos $\phi$	cos $\phi$
Fáze 1	287,89	292,44	64,16	54,59	0,84	0,77
Fáze 2	273,74	281,72	51,2	52,74	0,76	0,77
Fáze 3	276,75	291,46	47,4	50,59	0,88	0,77
Průměr	279,46	288,54	54,25	52,64	-	-
Průměr (%)	3,02	2,36	18,26	3,89	-	-

Tato procentní hodnota nesymetrie je také pro lepší vizualizaci zaznamenána v trendovém grafu měření. Měření pocházejí ze dvou dnů a sice během poruchy a po výměně frekvenčního měniče. Z hodnoty 18.26 % klesne k hodnotám kolem 3 %.



**Obr. 7.11** Trendová křivka procentní chyby proudu

Po výměně frekvenčního měniče byly rovněž naměřeny vibrace motoru. Při srovnání obou frekvenčních spekter rychlosti v grafu typu waterfall na obr. 7.12, je zde vidět vymizení amplitudy rychlosti na frekvenci 47 Hz, kde se projevoval frekvenční měnič včetně postranních pásem s odstupem otáčkové frekvence šestipólového motoru 16 Hz. Naměřené frekvenční spektrum po výměně měniče je označeno fialovou barvou.



**Obr. 7.12** Waterfall diagram frekvenčních spekter

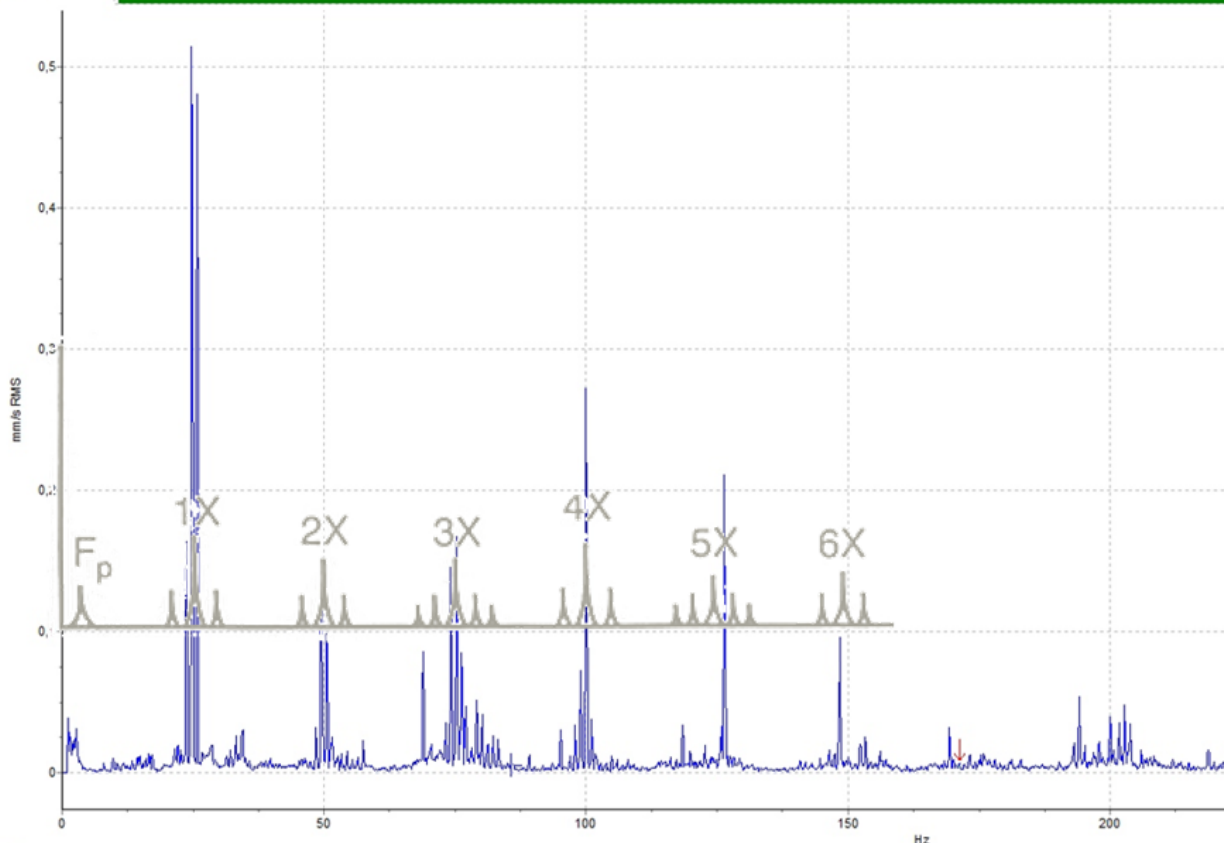
Při diagnostice tohoto motoru se ukázalo, že vibrodiagnostika závady s elektromagnetickou příčinou, je aplikovatelná. V tomto případě spolu se smyslovým posouzením v průběhu pochůzky poukázala na vyskytující se problém. Jak již bylo zmíněno, ne vždy lze z frekvenčního spektra jasně určit závadu elektromagnetického charakteru a je zapotřebí tyto hypotézy ověřit měření elektrických veličin. Díky tomu se dá zamezit větším škodám.

## 7.2 Měření motoru s přerušenou rotorovou tyčí

Toto měření bylo uskutečněno formou pochůzky ve společnosti Kimberly Düsseldorf. Štítkové údaje motoru se nacházejí v tabulce tab.7.6. Po měření proběhla analýza dat, při které byla zjištěna zajímavá skutečnost. Ve frekvenčním spektru rychlosti se objevují frekvence, které značí poruchu rotoru, konkrétně přerušeni rotorové tyče. Srovnání teoretického předpokladu a skutečného naměřeného spektra lze vidět na obr. 7.13.

**Tab. 7.6** Štítkové hodnoty motoru

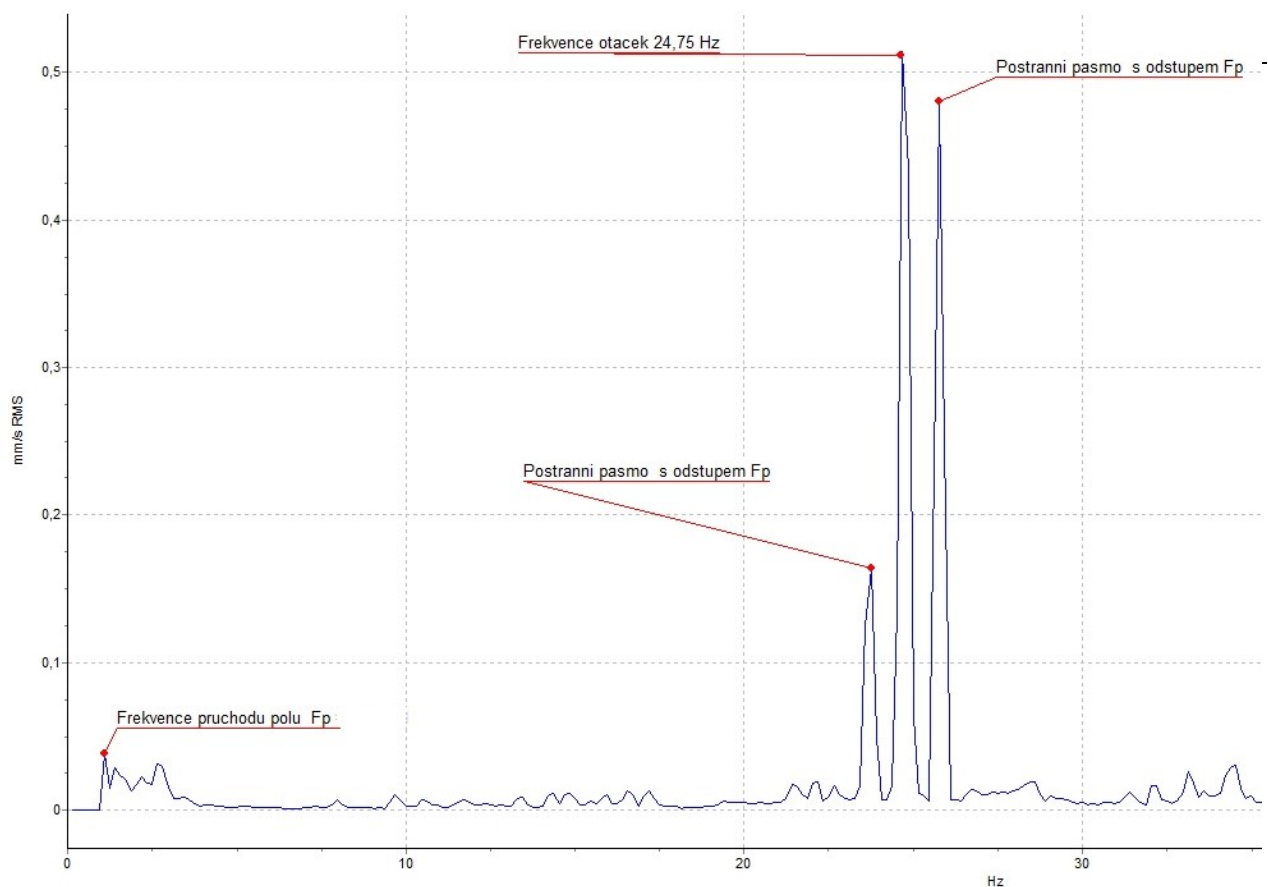
<b>Typ</b>	38Z540 – 3	<b>IP</b>	54	<b>izolace</b>	F
<b>v.č.</b>	129463	<b>IM</b>	3001	<b>zatížení</b>	S1
<b>U (V)</b>	400	<b>P (kW)</b>	5	<b>f (Hz)</b>	50
<b>I (A)</b>	3,5	<b>ot. (min<sup>-1</sup>)</b>	1470		



**Obr. 7.13** Spektrum přerušeni rotorové tyče

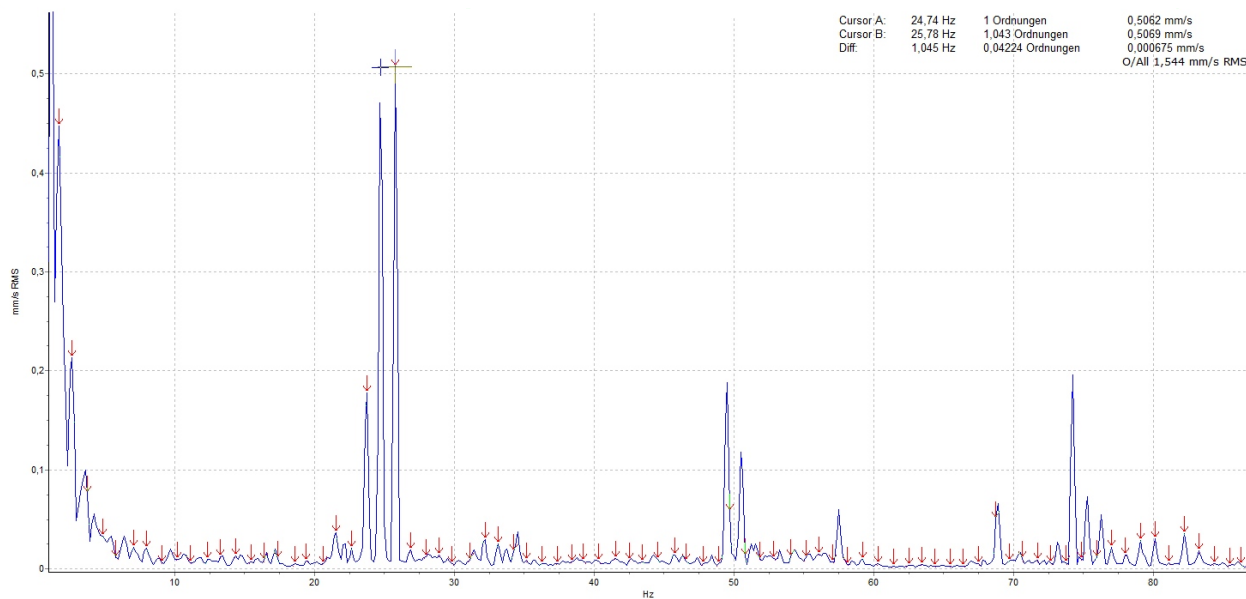
V analyzačním softwaru byl nastaven alarm dle normy ISO 10816-3. V grafu obr.7.13 je vidět zelená barva alarmu značící velmi dobrý stav motoru. Nicméně frekvenční spektrum ukazuje něco jiného. Přesně z tohoto důvodu se frekvenční analýza provádí, jelikož ukazuje závady v jejich počátcích vývoje. Frekvenční analýza závady přerušeni rotorové tyče ovšem potřebuje podrobnější analýzu a zjištění klíčových frekvencí. [1]





**Obr. 7.14** Poruchová frekvence s postranním pásmem

V přiblížení frekvenčního spektra okolo otáčkové frekvence 24,75 Hz lze vidět postranní pásmo s odstupem frekvence 1 Hz. Frekvence průchodu pólu se vypočítá jako násobek počtu pólů motoru s frekvencí skluzu. Frekvence skluzu je v tomto případě 0,25 Hz. Jelikož se jedná o čtyřpólový motor, tento vzorec sedí a porucha přerušování rotorové tyče je potvrzena. Na zadní straně motoru bylo také provedeno měření rychlosti a porucha byla potvrzena viz obr. 7.15.



**Obr. 7.15** Násobky poruchové frekvence

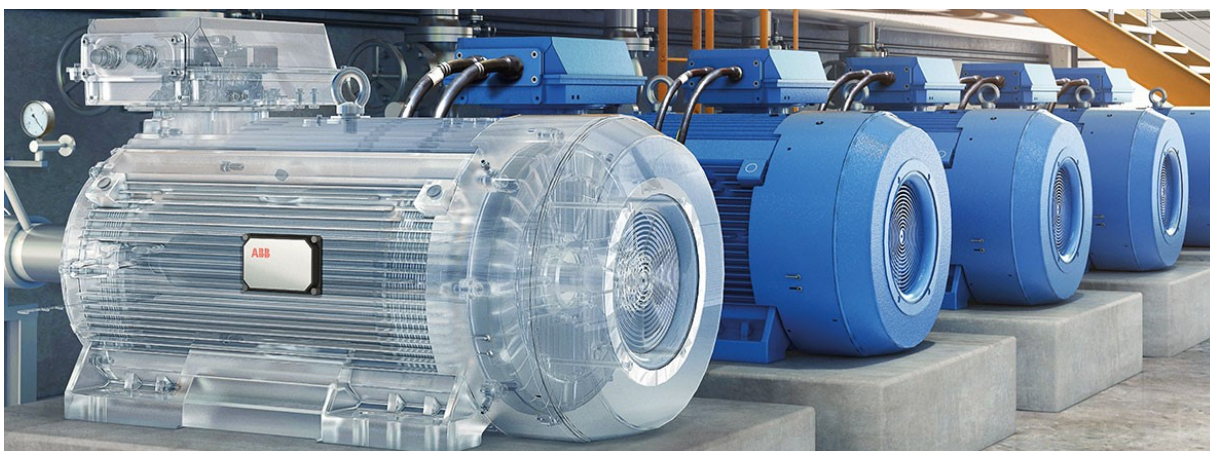
Jak již bylo v předchozím měřeném případě zmíněno, jsou mnohdy stanovené hypotézy o poruše motoru elektromagnetické příčiny ověřovány elektrickými testy. V tomto případě byla porucha ve frekvenčním spektru tak charakteristická, že elektrických testů nebylo potřeba. Zákazník tedy dostal informaci o poškození motoru. Společnost HE provedla na motoru pouze diagnostiku, nikoliv opravu, což znamená, že bohužel nebylo možné získat snímek demontovaného rotoru.

## 8 Budoucnost vibrodiagnostiky

### 8.1 Využití snímače ABB

V rámci posunu a vývoje techniky se uvažuje nad plnou automatizací služeb a výroby, což zahrnuje definice průmyslu 4.0. V obecném slova smyslu začínají technologie zastupovat a ulehčovat lidskou práci, především pak méně kvalifikovanou rutinní činnost. Technologický vývoj se týká také vibrodiagnostiky. Momentálně není umělá inteligence tak daleko, aby zastupovala diagnostiku v analýze frekvenčních spekter a rozhodovala o stavu daných zařízení. Co ovšem technologie dokáže je sběr dat. Automatizace sběru dat je tvořena online systémem, který zde byl již popsán. Vzhledem k vysoké ceně je ovšem aplikován pouze na nejdůležitějších zařízeních. Společnost ABB zkonstruovala snímač, který by měl v budoucnu těmto online systémům konkurovat. Cílem tedy je, aby snímač obsahoval každý nízkonapětový motor, tedy i ty méně prioritní z hlediska výroby.

Tento snímač zdaleka neumí to, co běžné analyzátoři. Navzdory jeho velikosti však umí měřit RMS hodnoty rychlosti vibrací do 1000 Hz, teplotu motoru a spotřebu energie, tedy i účinnost. Snímač pomocí bezdrátového přenosu bluetooth komunikuje s tzv. gateway, která shromažďuje naměřená data a odesílá je na cloud, kde mohou být analyzována a zpracována. Z těchto dat jsou poté vytvořeny trendy, podle kterých lze diagnostikovat stav motorů. Nikdy ovšem tato analýza nebude tak dokonalá jako frekvenční analýza. Snímač je tvořen baterií, jejíž výdrž je uvedena v rozmezí tří až pěti let. Poté je z ekonomických důvodů lepší snímač vyměnit.



*Obr. 8.1 Smart sensor ABB*

Nejlepším řešením by bylo, kdyby byla technologie online systémů finančně dostupnější, díky čemuž by ubylo rutinní práce při měřeních ve formě pochůzek. V budoucnu chce společnost ABB tento snímač zdokonalit a rozšířit rozsah měření na 10 000 Hz. Tento snímač upozorňuje také na ložiskové závady. Jakmile dosáhne ložisková závada 80 % životnosti, alarm upozorní na závadu. Cílem tedy je zautomatizovat sběr dat a měření. Na druhou stranu se tímto krokem omezí vizuální posouzení a individuální přístup v rámci měření formou pochůzky.

## 8.2 Vizualizace

Dalším bodem digitalizace je interpretace naměřených dat. Dnešní trend poukazuje na to, že vizualizace měření je také důležitá. V důsledku poptávky zákazníka vznikají portály a aplikace, které obsahují prostředí podobné softwarům pro zpracování dat. Zákazník v nich uvidí stav svých motorů, při komplikaci dostane zprávu o důležitosti problému. Portál bude obsahovat veškeré informace o daném motoru včetně fotografií anebo historie oprav.

## 9 Závěr

V diplomové práci bylo pojednáno o využití vibrodiagnostiky v dnešní době. Ve společnosti HE se provádí měření vibrací formou pochůzek a pomocí online systému. Vzhledem ke snižování nákladů se vyplácí výrobním podnikům investovat do vibrodiagnostiky, čímž se předchází neplánovaným odstávkám. Predikce poruch strojních zařízení zároveň zvyšuje bezpečnost osob a provozu. V mnoha případech si výrobní podniky zajišťují diagnostiku sami. Pokud má vyškolený personál, který nepodléhá tlaku šetření nákladů, jedná se o ideální případ. Společnost HE disponuje produktem technické diagnostiky, s tím, že není nijak ovlivňována. Technickou diagnostiku provádí jako externí společnost, která je výhradně zaměřena na frekvenční analýzu vibrací, doplněnou o diagnostiku elektrickými testy a termokamerou. V diplomové práci byla zdůrazněna důležitost frekvenční analýzy, pomocí které lze odhalit závady, ještě dříve, než na ně upozorní alarmy dle normy ISO 10816-3. Zároveň při pravidelném měření lze vyvíjející se poruchy sledovat a předpovídat životnost daného zařízení. Predikce vývoje poruch ovšem není daná žádnou normou a je závislá čistě na úsudku a zkušenosti diagnostika. Takovýmto predikcím zároveň pomáhá historie měření a trendové křivky, které poukazují na vývoj závad a charakter zařízení.

Pomocí online měření lze sledovat zařízení prakticky odkudkoliv. Měření řešením online systémem probíhá nejen v Německu, ale také v zahraničí. Zde je vidět trend dnešní doby, který umožnil vibrodiagnostice větší flexibilitu. V rámci analýzy frekvenčních spekter, lze zařízení diagnostikovat prakticky bez smyslového posouzení nebo jiných testů. Není tomu ale pokaždé, na což tato diplomová práce také poukázala. Absolutní preciznosti k určení jasné diagnózy dopomáhají také další měření vibrací anebo elektrické testy. Aplikace všech testů však zabírá hodně času a je také finančně nákladná. Proto se využívají dohromady jen pro speciální měření.

Budoucnost vibrodiagnostiky spočívá především ve zefektivnění sběru dat a automatizované frekvenční analýze. Takové řešení bude muset podpořit vývoj softwaru na úrovni, které se v dnešní době říká umělá inteligence. Způsob automatizované diagnostiky bude záviset na historii dat a také na důslednosti programu, který bude muset provázat klíčové frekvence. Zatím jsou stanoveny pouze hypotézy umělé inteligence v oboru vibrodiagnostika. Je ovšem jasné, že v následujících desetiletích přijdou první řešení a budou spíše pomocným nástrojem diagnostika, jelikož náročnost úsudku o stavu zařízení je i nadále složitá.

## 10 Citovaná literatura

- [1] **ČSN ISO. 10816-3. 2001.** *Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech.* [Česká technická norma] 2001.
- [2] **Bernat, Petr. 2006.** *Negativní vlivy měničů frekvence na asynchronní motor.* [Autoreferát doktorské disertační práce] Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2006.
- [3] **Biloš , Jan a Bilošová, Alena. 2012.** *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů.* [Skriptum] Ostrava : , 2012. 978-80-248-2755-1.
- [4] **Helebrant , František, Hrabec , Ladislav a Blata, Jan. 2013.** *Provoz, diagnostika a údržba strojů.* [Skriptum] Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. 978-80-248-3028-5.
- [5] **Helebrant, František a Ziegler, Jiří . 2005.** *Technická diagnostika a spolehlivost II. Vibrodiagnostika.* [Skriptum] Ostrava : 2005. 80-248-0650-9.
- [6] **Helebrant, František. 2007.** *Technická diagnostika a spolehlivost IV. Provoz a údržba strojů.* [Skriptum] Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2007.
- [7] **Hlaváček, Tomáš. 2015.** *Diagnostika vibrací elektrických strojů.* [Diplomová práce] Brno : 2015.
- [8] **Chmelík , Zdeněk, Mišák, Stanislav a Sokanský, Karel.** *Technická diagnostika na elektrických zařízeních.* [Dokument] Ostrava
- [9] **J.E, Berry. 2007.** *Illustrated Vibration Diagnostics Chart.* [Výukový materiál] : Technical Associates of Charlotte, 2007.
- [10] **Mišák, Stanislav. 2007.** *Technická diagnostika.* [Skriptum] Ostrava : 2007.
- [11] **Němeček, Pavel a Tomeh, Elias. 2010.** *Vibrační diagnostika základních závad strojů.* [Skriptum] Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2010.
- [12] **R.B, Randall. 1987.** *Frequency Analysis.* Denmark : Brüel Kjaer, 1987.
- [13] **Strachoň, Martin. 2009.** *Vibrodiagnostika průmyslových strojů.* [Diplomová práce] Zlín : 2009.
- [14] **Šimon, Stanislav. 2016.** *Vibrodiagnostika papírenských strojů.* [Diplomová práce] Ostrava : 2016.
- [15] *Technická dokumentace analyzátoru vibrací.* [Uživatelský manuál] Ostrava : Adash.